

声成像的研究进展及应用前景

Progress in the Research of Acoustic Image and Its Prospects for Application

张德俊

(中国科学院武汉物理所, 研究员 武汉 430071)

本文综述近代声成像的特点与基本分类, 着重介绍几种发展较快的声成像技术的国内外研究进展情况, 并对其应用前景及有待深入研究的课题, 进行评论。

一、声成像的特点与分类

声成像是通过记录物体的辐射或散射声场, 经过转换、重建或反演处理, 获得其外形或内部结构可见像的方法与技术。与已有的其它成像技术, 如可见光、X 射线、红外线、微波乃至磁共振等不同, 声成像是借助于反映物体机械性质的声学参量(声反射或散射系数、声速、声衰减及非线性参量等等)进行成像; 加上声波能在许多不透光的介质(如金属材料, 生物组织等等)中有效传播, 且对人体无害, 因而声成像在性质与应用上确有自己独特的优点。

声成像的研究始于本世纪初, 即郎之万(Paul Langevin)和索科洛夫(S. J. Sokolov)的年代, 可以说, 它是伴随着近代声学的产生而发展起来的。随后, 曾提出许多好的成像设想与方案, 并开展过大量的实验研究。遗憾的是, 限于当时技术条件, 未能取得突破。60 年代中期, 声全息、声层析(CT)等新的成像方法与技术的相继出现, 大大扩展了声成像的研究领域, 给人们带来新的希望。1967 年开始, 声成像的专业性国际会议接连召开, 文集连续出版。70 年代, 随着电子计算机、数字化电路、高集成度微电子器件及各种信息与图像处理等新技术引入声成像领域, 以医用 B 超为代表的超声脉冲回波扫描成像, 获得突破性进展, 与 X 光透视、XCT、磁共振一并成为现代四大医学成像技术。应该说, 80 年代以来, 声成像面临极好的发展形势。一方面, 由于各种新技术、新工艺、新器件的出现, 为实现已有的成像方案提供了有利条件; 另一方面, 新的成像原理

与技术还在不断涌现; 加上近代工业、尖端科学各种关键设备的质量检查及医学诊断等应用向声成像提出的更高要求, 声成像必将受到更大重视与更多支持, 成为声学学科的一个重要分支并酝酿着新的突破。

参照美国著名声成像专家韦德(G. Wade)的分类方法, 近代声成像可分为以下三种基本类型:

1. 强度—绘图方式, 包括用于生物医学及材料检测的扫描声显微术; 透射式 C 扫(T 型扫描), 声透镜成像等等。

2. 脉冲—回波方式, 包括医用 B 超(线扫、扇扫及相控阵扫描等), F 型扫描系统, 声呐、地质勘探用的线阵成像系统, 用于 NDT 的 C 扫、B 扫、3D 实时显示成像术等等。

3. 相位—振幅方式, 包括基于波前重建原理的声全息(常规全息及近场声全息 NAH), 声层析(射线及衍射 CT、全角度及有限角 CT、透射与反射式 CT 等), 布拉格(Bragg)衍射成像等等。

近几年来, 还出现了综合两种方式优点, 构成交叉性新的成像方式, 如超声全息 B 扫(UHB), 扫描声层析显微镜(STAM), 全息横断面声呐(SCS), 综合孔径聚焦(SAFT), 同步动态聚焦(SDF)以及各种三维和多维(Multidimensional)成像技术也竞相发展。最近还出现了完全崭新的原理及方式, 如非线性参量成像、声子成像等等。为了直观, 将声成像的这种分类用图 1 示出。

二、几种声成像技术的研究进展

1. 医用 B 超及多维成像

B 超是声成像中研究最充分、应用最成功的一种。高档 B 超, 如 ATL 公司的超 9 型, HP 公司的 SONOS 1000 型, ACUSON 公司的 128XP 型, ALOKA 公司的 SSD-2000 型及我国安科公司的

ASUOIC 型等等,大都采用相控阵技术使超声波束具有动态孔径、动态聚焦性能,使整个视野的图像分辨率小于 1 毫米,可以清楚地显示微细血管及细小淋巴结图像。进入 90 年代后,先进的 B 超还采用伪彩色编码技术,实现了声像的彩色灰阶显示,提高了视觉分辨率及疾病的检出率。除用于经皮式检测的线阵、凸阵、相控阵探头外,还配备了各种扫描方式的腔内探头,如食道、尿道、阴道、直肠探头等等。从此使医学超声成像进入了所谓“全身彩超诊断”的新阶段。

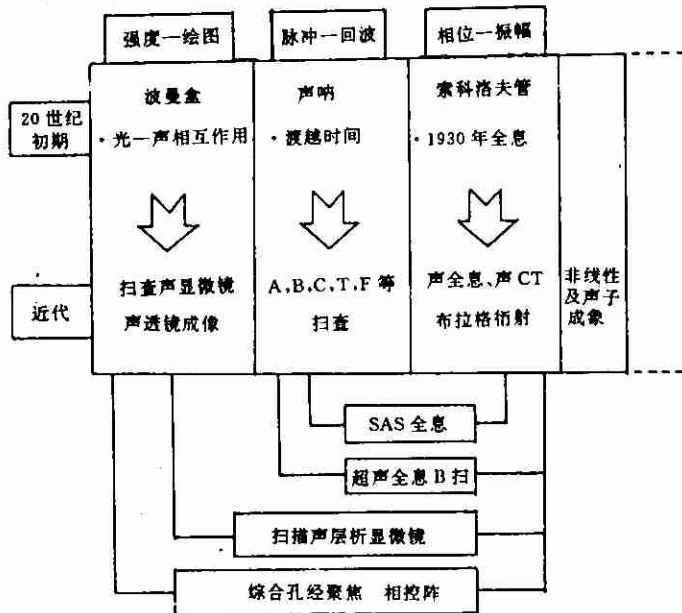


图1 声成像的基本分类图解

值得注意的是,当前 B 超正向三维,特别是多维实时成像方向发展。美国的格林里夫(J. F. Greeleaf)在第 20 届国际声成像会议上,报告了他正在进行的“多维心脏成像”研究。他用一个经食道的 5 兆赫步进式旋转探头,以 30 帧/秒的采样速度,得到一系列二维回波心动描记(Echocardiographic)的选通像数据,将其数字化并传递到 Sun4 型计算机工作站进行处理,回放显示出的图像使人惊奇地看到了一个完整的跳动着的心脏。此外,它还可以选看任意角度下心脏的断面像,并可连续改变断面方位,让医生从各个方向进行观察诊断。图 2 是整个心脏和心室超声数据的阴影表面显示。最近,美国 TOMTEC 公司已推出此类商品。可以预计,这种多维成像一旦投入临床应用,将能使医生对心房隔膜、二尖瓣瓣膜、主动脉瓣膜及胸主动脉等结构与动作状况的诊断一目了然。

在医学诊断中,日本北海道大学的山本克之(K. Yamamodo)进行的用于测量动脉弹性的血管内超声成像技术,以及东京工业大学大规茂雄(S. Ohtsuki)开展的二维多普勒血流成像技术也已取得引人注目的进展。

国内,南京大学的龚秀芬等,在生物组织的非线性参量 B/A 成像方面取得的研究进展,也在声学界和医学界引起很大兴趣。

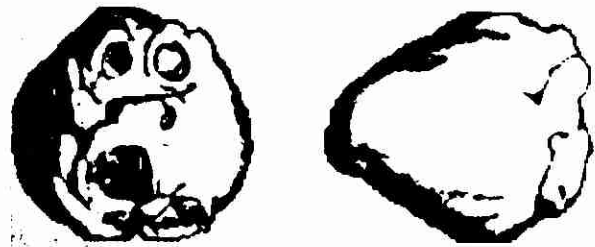


图2 多维成像获得的完整心脏和心室的一个表面阴影显示

2. 工业无损检测用的超声成像

工业无损检测的对象大多是金属或非金属材料,相对于人体软组织而言,超声在固体中成像,存在一些特殊难点。如固体中存在多种波型(纵波、横波、表面波、板波等等),且在一定边界条件下可以相互转换,给声束控制增加了复杂性。又如,固体中声速远比人体软组织中声速大,在相同频率下,难以达到高的分辨率,或许这就是工业检测超声成像发展缓慢的原因之一,但这方面的研究也在积极进行。

不少人探索了在 B 超基础上,专门设计探伤探头的简便方案。法国阿拉斯(P. Alais)采用将每个线阵阵元以一定倾斜角作阶梯式排列,以激励纯横波,并通过相控阵使固体中声束聚焦,获得钢试块内 7 个直径为 0.3 毫米人工伤孔的可辨认的图像。

国外已将单探头扫描成像运用于焊缝的缺陷显像,并有商品销售。



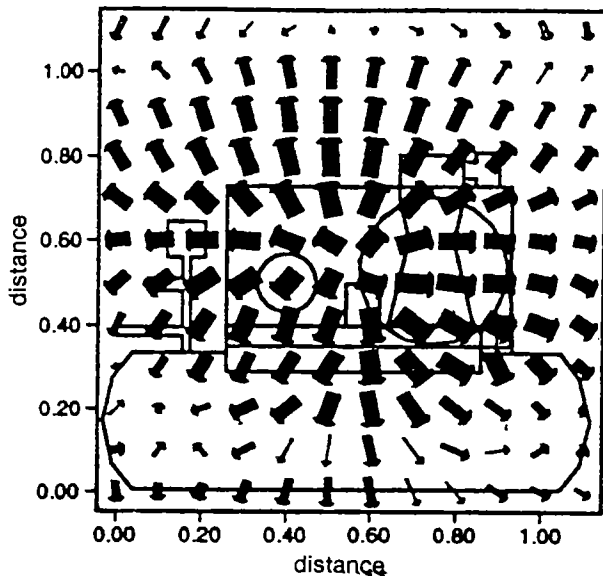
图3 壹分硬币表面的超声 C 扫图像

国内在超声成像检测方面,达到应用阶段的是 C 扫成像,特别在航空工业用的蜂窝结构复合材料的粘合质量检查上,航空部 621 所等单位已取得良好效果。中科院声学所汪承灏等研究了固体中动态聚焦声成像。沈建中等用几十兆赫的聚焦超声对一种特殊陶瓷进行 C 扫检测,已能清楚显示约 30 微

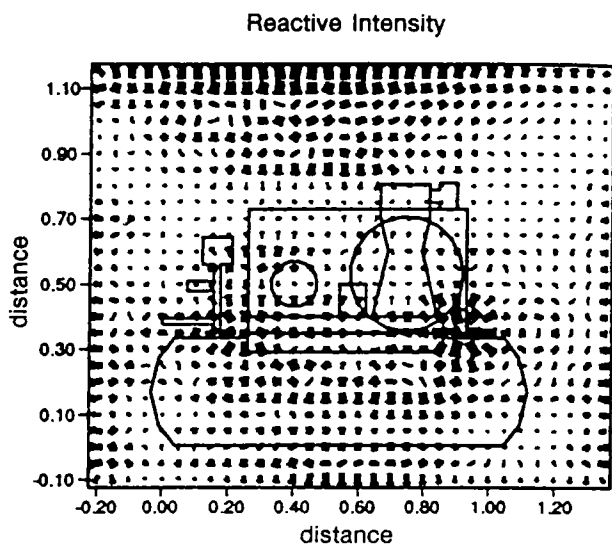
米线度的缺陷图像。图3为他们实验获得的壹分硬币表面的C扫图像。该所朱维庆等将小基阵声呐成像应用于水下机器人的“视觉”搜索系统,已获成功。

3. 近场声全息成像

近场声全息(NAH)是80年代由常规全息领域脱颖出来的新生长点。与常规全息不同的是,NAH



a) 常规声强测量



b) BAHIM 法测量

图4 BAHIM 法与常规声强测量 300 赫时空压机的噪声定位结果比较

在紧靠振动体的测量面上记录包含有“倏逝波”成分的全息数据,并将其运用于重建处理,所以它可以获得不受振动体辐射波长限制的高分辨率振模成像及其辐射场矢量声强的空间分布。特别适用于

研究物体低频振动模式及其辐射场的关系,尤其是理论上难以计算的不规则形状物体。同时也可用于复杂物体结构强度及复合材料粘接质量的检测,以及噪声源的定位等。

NAH 的基本理论已由美国宾州大学的威廉斯(E. G. Williams)和梅纳德(J. D. Maynard)清楚地阐明。他们建立了以近场声压做为全息数据的成像过程理论模拟。近年来,法国洛伊(T. Loyau)和帕斯卡尔(J. C. Pascal)等提出以测量近场声强为全息数据的宽带声全息重建,即 BAHIM 法。其优点是记录全息数据时,不需要与声源同步的参考信号。因而特别适合于宽带噪声源定位等应用。最近,他们用这种方法,对一个非平面声源——工业用的空压机成功地进行了噪声源定位,分别对 300 赫、720 赫、870 赫和 1 040 赫的噪声峰值频率进行测量,获得的噪声源部位,远比一般声强测量结果精确,为减噪(特别是有源消声)提供依据。图4示出 300 赫时,用 BAHIM 法及常规声强测量噪声源的定位结果比较。

笔者所在的课题组,在国家基金资助下于 1990 年开始开展了 NAH 测量表面振动及空间声强的研究。在分析各种误差来源及对 NAH 重建影响以及提出新的空间频域滤波函数,克服重建结果的不稳定性等方面取得创新性进展,建立了国内第一套空气中使用的 NAH 实验系统,并对一些典型振动体进行实验,取得有意义的结果。图5为对模拟古代乐器“磬”的形状制成的一个钢磬,在其“鼓”的部位以 154 赫频率强迫激励下,用 NAH 重建出的振动模式。

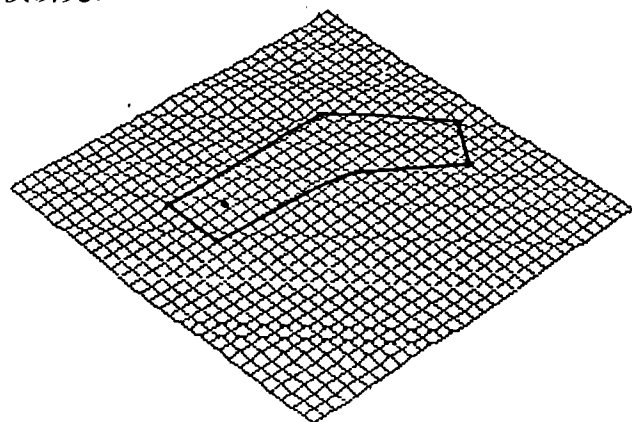
从国内外发展趋势看,关于 NAH 应继续深入开展的课题有以下一些:任意形状振动体的三维重建,振动模式的动态显示,空间频域的滤波处理,通过内插外拓减少数据采样数目,提高反演速度和重建像分辨率等。

4. 声层析成像

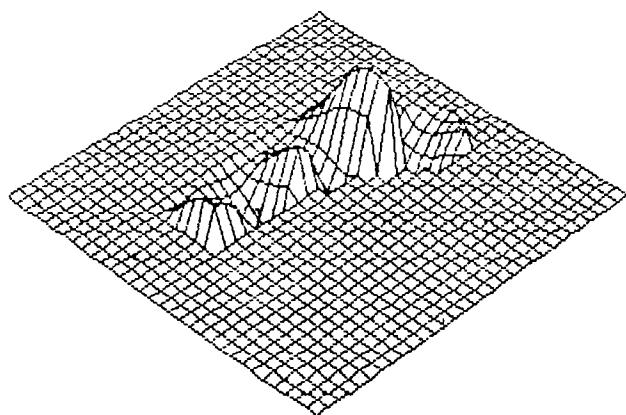
声层析(CT)是70年代初受X射线CT的启迪和促进发展起来的。由于它可以获得照射声束通过的切片上介质声学参量(声束、声衰减、声折射系数等)分布的断面图像,而且是这些参量的绝对值分布,因而在无损检测、医学诊断、海洋参数反演及地质结构探测等许多重要应用方面,日益显示出良好的前景。国外这方面的研究一直甚为活跃。70年代中后期,格林利夫(J. F. Greenleaf)等人的工作主要是围绕透射式声CT,其重建算法是基于渡越时间法(time of flight),重建的声学参量是衰减和声折射分布。80年代后,韦德(G. Wade)、米勒(R. K. Mueller)等对反射式超声CT进行研究。其重建算法不仅考虑超声的衍射效应,而且开始探讨非弱散射条件下声CT成像的理论问题。

国内,中科院武汉物理所兰从庆、许克克等,于1985年开始,相继开展了超声衍射CT成像算法研究及反射式CT成像研究国家基金课题。在有限角超声CT成像的叠代算法、反射式声CT成像的傅里叶切片理论、单发/收探头扫描、声CT成像中波阵面弯曲的修正等方面,做出创新性成果。用自行研制的带有快速数据采集和精密机械扫描、旋转装置的实验系统,对带有直径分别为1毫米、2毫米、3毫米孔的圆形铝棒样品,获得清晰的重建图像,如图6所示。论文在亚太地区无损检测国际会议发表,被评为亚洲声CT研究十大进展项目之一。

此外,国内不少单位正开展地质结构的声CT反演研究。



a)模拟钢磬的形状



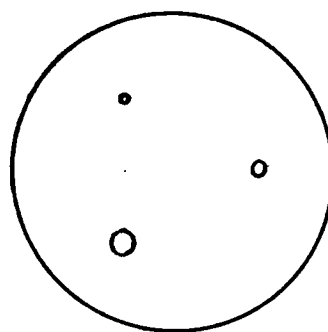
b)NAH 重建的振模

图5 模拟磬在154赫频率强迫激励下的振模重建

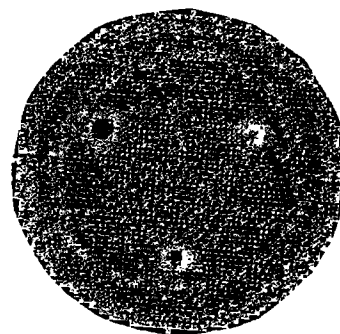
5. 超声显微成像

在声成像中,超声显微镜的设想是萌发最早,倍受注意的一种。它在医学和微电子器件(大规模集成电路)高分辨率检查上具有独特优点和重要应用价值。美国奎特(C. F. Quate)于70年代中,用600兆赫频率的扫描声显微镜(SAM)获得的红血球声学图像远比光学显微图像清晰并具有更强的立体感,给人留下深刻印象。此后,进行了大量提高分辨率的研究。同时,为解决生物学所需要的较

厚或结构较复杂样品的精细检查以及集成电路器件的分层检查,将声CT的原理引入声显微镜,于是形成了扫描层析声显微镜(STAM)。韦德、李(H. Lee)等对此进行了研究。用平面超声波照射样品,并用激光进行检测,便形成扫描激光声显微镜(SLAM)。美国R. K. Mueller等对此进行了研究。现在,美国、日本、俄罗斯等国均有工作于100兆赫以上频率,最高分辨率达1微米左右的不同类型超声显微镜的商品问世。国内,中科院声学所、清华大学等单位在SAM方面研究取得进展,南京大学的张淑仪等在热波显微成像方面取得多项成果。



a)样品几何形状



b)重建像

图6 带孔铝棒的超声CT成像实验结果

三、结束语

综观国内外声成像发展趋势,令人振奋。在应崇福院士、魏墨鑫教授倡导下,中国声学学会检测声学会分会决定增设“声成像专业委员会”。这势必进一步推动我国声成像的研究。虽然声成像的许多技术在跨入应用前,还有许多工作要做,但从今天B超已把人体变得“透明”得到启示,或许有一天,声成像能把一切透声物体,乃至海洋和大地变得“透明可见”。

(责任编辑 肖庆山)