

# 声 学 的 进 展

关 定 华

(声学研究所)

**[提要]** 声学是近年来发展最快的学科之一,本文着重就当前活跃的分支学科,如:物理声学,海洋、大气及地壳中的声,超声检测、评价和成像,声与物质的相互作用,环境声学和与人类信息文化交流有关的声学等问题进行了较详细的论述。最后,对我国声学研究的发展提出了一些建议。

## 一、声学的特点

声学是研究物质中机械波的产生、传播和接收及其与物质相互作用的科学。声学既是一门老学科,又是一门新学科。我国发掘出的商代编磬(公元前 17—12 世纪)已有很接近自然律的乐律,比毕达哥拉斯利用弦提出自然律的乐律要早一千多年。但声学又是年轻的、生气勃勃的新学科。它的一些分支学科是近年来才出现的,如表面波器件,它的年龄和大规模集成电路差不多;语言识别与合成的真正进展是在电子计算机高度发展之后。声学与近代物理有密切的关系。本世纪初发展起来的固体物理不断从经典物理和声学借用概念,而今天的超声学则又从凝聚态物理吸取营养。声学总是随科学和技术的进步和新的需要而不断发展。可以说声学是近年来发展最快的学科之一。

现代声学的特点是:

1. 声学中的波动与振动问题的大部分基础理论已经比较成熟,而一部分与近代物理有密切关系的问题,如非线性、混沌、分叉,声与物质相互作用等问题,与生命科学有关的听觉和感知问题等还远未解决,尚需付出很大努力。

2. 与其它学科交叉产生的新学科和基础理论在不同应用范围内的基础问题是当前最受重视、研究力量投入最多的领域。

3. 非常广泛地渗入到物理学其它分支、其它科学技术和文化艺术领域中,并在国防、国民经济和文化生活中应用极广。有相当一部分应用与电子学、计算技术、微电子学、数字信号处理有密切关系。这些技术的飞速发展,使声学的应用技术日新月异,不断推陈出新。

声学是一门应用物理学科。但应用技术的发展离不开基础研究和应用基础研究。

## 二、当前活跃的分支学科

在国际上声学中最活跃的分支学科有物理声学、超声学、水声学、振动与噪声、语言声学、

生理声学、心理声学等,现按涉及的方面分为物理声学、海洋、大气和地壳中的声,超声检测评价和声成像,声与物质相互作用,环境声学,与人类信息和文化交流有关的声学问题等几方面介绍。

**(一) 物理声学** 物理声学研究声学的最基本问题,与近代物理有密切的关系。目前最受重视的是非线性声学、量子声学等方面。

1. 非线性声学 振幅大的声波有非线性现象。非线性声学研究的歷史很长,但由于理论上的困难,许多问题现在尚未解决。声吸收、冲流、辐射压、空化、声散射、参量放大、声疲劳等一直受到人们的注意。声参量发射阵和接收阵利用非线性构成低频高指向性的基阵在水声中很受重视。

80 年代一个令人兴奋的重要发现是多数非线性系统都可以从“有规律的”变化转变为“混沌”状态——不可预计的无规过程。最常见的是通过周期加倍转变为混沌。空化噪声就是一个例子。用强大超声束射向水面,开始时气泡按超声频率振动,超声加强后产生二倍周期振动,再加强又出现四倍周期振动,最后频率连成一片,发出无规噪声。在水波实验中也得到周期加倍的现象。近年来非传播的孤立波研究受到各方面的注意,对其转化为混沌和多个孤子相互作用的研究均有进展。

2. 量子声学 考虑到媒质和声波能量的不连续性,着重讨论的是声子与物质微观结构的作用,包括它与其它准粒子或元激发(如热声子、各种激子)及基本粒子(光子、电子)碰撞等相互作用。这就使量子声学的研究出现了广阔的领域,如声子-光子,声子-声子,声子-核自旋,声子-电子,声子-中子等的相互作用及许多声子过程。这些相互作用是揭示近代物理中许多重要现象的基础。

另外,声子在解释超流机制方面起了重要作用。一般说来,当频率高到  $10^9$  赫以上量子行为即显示出来,但在接近绝对零度时,量子液体中的量子行为,在几千赫的频率下就会出现,如在超流液氦中就出现通常流体中所没有的波模式,如第二、三、四声就是与超流性紧密相联的特有模式。随着近代物理研究的进展,量子声学还会揭示出更多新的物理现象。

**(二) 海洋、大气及地壳中的声** 在海洋、大气和地壳中,声可以传播很远的距离,可用来在这个范围内代替电磁波进行探测、通信等活动。

1. 水声学 它是研究声在海洋中的传播与应用,可分为如下几个方面。一是声在海洋中传播的规律。近年来对各种水文条件下(包括声道、反声道)的声传播,水文条件在水平方面有变化时的声传播(包括中尺度涡旋、海底山)进行了大量研究。除简正波方法和射线方法外,还发展了许多适宜用计算机数值计算的方法(如抛物方法 PE)。波浪、内波、气泡和微观不均匀引起的声散射,传播衰减和信号起伏,以及信号的多径传播和频散引起的畸变,海中的散射场、混响场、目标反射的谱结构,海洋噪声的特性及产生机制等方面研究都有很大进展。另一方面是逆问题,即根据声传播的衰减、到达时间、信号起伏、散射和反射信号等反推海洋环境的特性,这也可以称为声遥感。目前受人们重视的是海底底质特性声遥感,内波声遥感等。近年兴起的海洋声层析术是利用设在被测海域周边的多个发射接收站之间的双向声传播时间来反推该海域的温度场和流场。这种方法可以探测中尺度(100—200 公里)的旋涡。去年人们开始使用低频声波在深海声道中的远距离(一万公里以上)的传播到达时间来测量由于温室效应产生的地球变暖,用这种方法能测到  $0.02^{\circ}\text{C}$  的变化。这种方法叫大洋气候的声学测温法。

(Acoustic Thermometry of Ocean Climate)。水声学的另一个重要方面是各种军用和民用水声设备的发展。由于电磁波在海水中衰减很大,故在海下必须改用水声设备。它包括各种舰用、岸用、航空兵用的声纳,鱼雷声制导装置,水下通讯、导航和数据(包括图像)传输系统,鱼群探测仪,海底地形地貌探测用的多波束测深声纳和测扫声纳,探测海底的地层剖面仪,海底地震勘探系统等。随着信号处理技术、计算机和微电子技术的发展,上述设备将不断更新换代,并在国防和国民经济中起着越来越重要的作用。

2. 大气中的次声 这类声可以传播很远的距离。巨大陨石与地球碰撞的声音通过大气中的波导可以绕地球几周。次声接收系统可以观测到台风、雷暴、海啸、地震和核爆炸等产生的次声。长周期的次声波除弹性作用外还附加了重力作用,故称为声重力波。它可以进一步揭示电离层扰动的规律,因此极受人们的重视。使用声雷达可以探测大气中的湍流。

3. 地壳中的声波 它是观察地壳内部结构、变化的重要手段。地震波是监测地球上地震的主要手段。利用自然地震和人工震源,可以探测地壳板块结构和石油、天然气等矿藏的分布。最近发展的三维地震成像系统,可以给出地壳结构的三维图像。在地震观测中,测定了固体地球的简正振动,找出了地球内部运动的准确模型。在月球上放置的地声接收器对月球内部监测的结果也是令人满意的。进一步监听地球内部的运动,最终必将实现对地震的准确预报,从而避免大量伤亡和经济损失。

**(三) 超声检测、评价和成像** 工业和高技术的发展对材料和结构的无损检测的要求愈来愈高。近年来超声检测发展很快,从定性到定量,最后还希望看出伤的像。超声在固体中的传播、吸收、散射和在缺陷上的衍射是超声检测的基础,近年来在理论和实验研究方面都有较大进展。超声评价是用超声测量材料的强度、应力等。被测物体往往是不透明的,所以在检测中要求形成声像,也就是表现物体声学性质空间分布的可见的像。成像是当前超声检测的热门。成像包括两部分,一部分是探得物体声学性质的空间分布,另一部分是把这些信息转化为可见的像。过去曾试过多种成像方法,自计算机和显像管系统发展之后,最通用的办法是把测到的信息转化为电信号,然后再在荧光屏上显示。

医学诊断用的“B超”是家喻户晓的超声成像的例子,这项技术也仍在不断完善中。由于人体内部媒质的不均匀和提高分辨率的需要,使动态聚焦等技术不断发展。三维成像技术能提供更直观,更全面的人体器官的立体超声像,这将大大方便于医学诊断。这种技术现正在发展中,在如何取得和显示三维图像方面还有不少工作要做。

在医学诊断中除了希望看到内脏的形像之外,更希望能判断机体有无病变。测量非线性参数  $B/A$  和生物机体对超声的散射与吸收的研究,近年来有很大进展,用这些办法有可能判断机体的病变。

成像技术包括声全息成像、近场声全息成像 (NAH)、超声合成孔径成像 (SAFT) 和声 CT 技术等。声全息在医疗诊断、无损检测和水下目标显示方面都有应用前景,但由于声波波长较长,存在分辨率低,散射较复杂,光重建像畸变较严重等缺点,在推广方面受到一定限制。

为对物体细微部分进行检测,近年来发展了多种超声显微镜。机械扫描式声显微镜 (SAM) 的分辨率可达到 50nm,理论和实验证明还可以提高,它在材料科学、集成电路、医疗和生物方面有重要作用。激光扫描声显微镜 (SLAM)、电子束超声显微镜 (SEAM)、隧道声显



微镜 (TAM) 的研究都有不少进展。在固体物理中进行超声检测时,由于波型复杂,超声诊断技术不太适用,现正在发展新方法。

**(四) 声与物质的相互作用** 包括声场与其它波场的相互影响与转化,声对物质的作用。

1. 声光 声波产生的周期栅阵能引起光的衍射效应(布喇格衍射、拉曼纳斯衍射)已早为人知。目前用这种原理构成的频谱分析器具有宽带、高频、通道数多等特点,在电子战侦察和对抗中有很应用前景。激光技术的广泛应用大大促进了声光器件的发展,已研制成功的声光调制器和声光偏转器,正在越来越广泛地应用于调谐滤波器、光存储器、脉冲发生器、Q 开关锁模激光器及光扫描器等。

利用声光效应构成的光学计算机极有前途,它具有高速、多通道并行处理、体积小和功耗低等特点,目前已达到等效 8000 亿次二进制运算。

光纤中声致形变导致导光波的幅度、相位、偏振状态的调制,可用于光纤水听器和光通讯。

2. 光声 周期性强度调制的光束在被照射物内产生声信号,这一特性现已被用于光声谱和光声显微镜。

3. 光声谱技术 当照射光改变频率时,光声信号随光频改变,得出光声谱,它代表物质的光吸收谱,现用于各种凝聚态物质的微量乃至痕量分析。

4. 光声显微镜 聚焦激光束在固体表面扫描,得出的光声信号成像,可对金属、陶瓷、集成电路的表面或亚表面结构进行声成像。

高功率激光源可以不接触媒质而激发声波,可进行特殊情况下的超声检测或水下通信。

5. 超声表面波器件 用超声表面波原理构成的延迟线、滤波器、谐振器和卷积器在雷达通信等高频信号处理中有广泛应用。相应的晶体中表面波的激发、传播等方面的研究在不断发展。

6. 声致冷 声能导致热输运这一现象近年来很受注意,最近设计的声致冷机能降温到 80 K,很有发展前途。

另外,超声驱动的声马达和声悬浮也很受重视。

7. 声的机械作用 强度大的声波有乳化、凝聚、粉碎、弥散和雾化等作用,已用于燃油掺水乳化、清洗、加工、加快化学反应,处理种子、破碎细胞、外科手术和粉碎结石等,但这些作用的机理还不够清楚。研究表明,相当一部份在液体中的作用是与声空化有关,液体中声空化泡崩溃时的极短时间在其周围极小空间内产生 5000K 以上的高温和约  $5 \times 10^7 \text{Pa}$  的高压,温度变化率高达  $10^9 \text{K/s}$  并伴生强烈的冲击波和射流。空化的研究是当前的热门。

8. 声化学 声化学是利用超声加速化学反应,提高产率,它主要是靠声空化的作用。目前最重视的是化学合成中均相声化学、多相反应、相转移反应、催化物化作用、聚合物的降解、引发和聚合反应等。这是一门新兴的学科,可望对农药、合成药物、塑料和微电子等工业带来重大变革。

**(五) 环境声学** 噪声是当前重要公害之一。噪声控制日益受到人们的重视。噪声源的研究,声源定位和有源噪声与振动控制是当前的热门课题。

噪声控制的传统手段是吸声、阻尼和隔离的方法,或称无源方法。有些低频噪声源的强度很大,如果不加控制会产生很大的破坏作用。而传统的无源控制方法,对低频噪声的控制能力

很弱。为解决这方面的问题,多年来人们一直考虑是否可以用相位相反的声来抵消噪声,叫做有源消声,但这种想法一直到最近,在计算机、数字信号处理技术(特别是自适应技术)和微处理机技术发展之后才逐步实现。理论上讲,在一个包围声源的封闭面上布设单极子和偶极子声源,就可以消除向外辐射的噪声,但在实际上,情况往往更为复杂。因此,到目前为止,还只能在一些特殊的场合,如像耳机这样的小的封闭空间,或在管道中这样二维的情况下才能产生比较好的消声效果。在大的封闭空间或开扩空间中则只能在一定程度上降低噪声或较好的降低向一定方向辐射的噪声。有源噪声控制主要在低频范围效果较好。要想进一步提高控制效果,还必须加强对各种边界条件下声场的了解,以发展更好的声源和控制方法。

对结构声进行有源控制是减少噪声辐射的好办法。做法是把振源布置在结构上合适的点上,通过自适应方法,用适当的强度和相位激发振源,以消除结构的振动,从而降低噪声的辐射。由于是两维的问题,结构声的有源控制比空气声的有源控制要简单。

1. 声强测量法 这种方法目前很受重视,它了解噪声场的结构、能流走向和声源定位都有重要作用。声强测量可以使用二传声器法或加速度计法。二传声器法用两通道和差,或用双通道 FFT,可以快速、准确地测量噪声能流,判断声源位置。在列车噪声、吸收测量、结构分析、机器监测和机器故障诊断中有很好的应用。

2. 噪声源研究 近年来人们很重视对各种流体发声、冲击声源的研究,在理论上和实验上都有重大进展。

3. 建筑声学 除传统的混响时间之外,又不断建立新的音质标准,使之更适合人的主观感受。在设计方法上广泛使用计算机模拟。在测量方面也广泛使用计算机控制的设备,测量各个点听到的直达声和各处回声的结构。

**(六) 与人类信息文化交流有关的声学问题** 随着通信技术、数字技术、微电子学、计算机和机器人的高速发展,人类的信息和文化交流愈来愈方便。在家里用口语通过电话控制计算机,指挥机器,使用计算机秘书,使用微机多媒体系统,享受和在大剧院、电影院中同样的演出效果,这些过去不可想像的事,不久将逐步进入人类的生活。这背后的技术就是语音识别与合成、语音和音乐的编码与压缩、数字信号处理技术。为了发展这些技术和应用,将有一系列的基础性研究和新技术开发工作要做。

1. 语音识别与合成 语言是人类进行信息交流最自然和基本的方式,毫无疑问,它也是人与机器之间信息交换的最理想的手段。能听会说的机器是人类多年的理想。使计算机也具有人类那样用自然语言交流的能力,已成为发展新一代智能计算机的一个重要研究目标。让机器说话有两种办法:一种是录音和重放;一种是把文字转换为语音,模仿人类说话,或叫文语转换系统。目前的记录与重放是用数字方式存储,为了降低存储量,在存储前进行数据压缩,使用好的压缩技术可以不降低语音的质量。这样放出的语音比较自然,但只能讲存进去的话,不能加以改变。目前市面上出现的会说话的机器大多是这种系统。类似的技术也在通信中使用,以便节省信道。文语转换系统是先建立来自原始自然语音的样本构成的音库,这些样本以某种参数形式存在。在文语转换时先由文字码转换为基本发音单元,组成的“言语码”包括声调、重音、长短、停顿、语气等代码,然后控制语音合成器发出声音,产生连续的语句输出。这种合成语音的优点是原则上可以用口语表达一切文本。但目前这种系统发出的声音,大多带有机器腔,要使机器能像人一样说话,除深刻掌握人类讲话发音的规律外,还要使机器能充分

理解它要讲的那段文字,这还需要做相当多的工作。

语音识别的难度更大。目前广泛使用的是模式识别方法。小词汇量的不认人的自然讲话识别系统,已在电话网中使用,代替了接线员的工作并产生巨大效益。小词汇的声控机器,如声控锁已出现产品。中词汇量的航空公司查询系统已能演示。大词汇量的孤立词识别系统已在市场上出现。限于书面语言(华尔街日报)的大词汇连续语言识别系统已能够演示,但还没有成为商品。不认人、大词汇、连续语言和自然口语是识别中的几大难点。对人类语言知识的掌握和计算机的能力是语言识别系统的重要限制因素。预计在今后若干年内将会逐步解决。当前,用语音控制计算机操作是个热门,一两年内这种商品就会出现。

汉语有其特点,一字一音,不计音调总共只有四百多个音,因此识别音比西方语言容易,但一个音对应多个汉字,知道音之后判断字还有许多困难。即使是键盘拼音输入系统,要实现“盲打”目前也还做不到。需要有更好的理解系统。

能辨别发音人的发音人识别系统也取得不少进展,如类似指纹的“声纹”就对发音人有一定的鉴别作用。

2. 听觉 五十年代 von Békésy 曾精辟地研究阐明了内耳听觉中心——耳蜗的构造和特性。蜗管中的基底膜是一个频率分析器,把声信号的频率信息转换为电信号和神经脉冲,经神经系统输入大脑。但测得的基底膜的共振特性并不尖锐而人耳鉴别频率的能力却非常强。近年来在耳蜗生理学和耳蜗力学方面有巨大的进展,突破了 Von Békésy 耳蜗模型的局限性。有关耳蜗频率选择性的研究表明,参与频率分析的不只是基底膜振动的机械调谐,还可能“第二滤波器”,它主动地参与调节整个柯蒂器的感受性和选择性,加锐了耳蜗的机械调谐,使之达到听神经频率选择的水平,也就是有更精细的分析机制。微电极描记出的内毛细胞调谐曲线,完全达到听神经的选择水平,揭示出这种加锐滤波器的机制很可能和外毛细胞的活动有关。但近年来的进展仅限于外周听系统,而耳蜗与皮层之间的听觉信息加工仍然是一个必然王国。要建立完整的听觉理论,辨释所有的听觉现象,还需要做大量的工作,这涉及对大脑功能的研究。听觉另一受到较大注意的是两耳相关问题。在音乐厅内听音乐时,从两旁反射的声音会使音质提高,辨释是两耳听到的声音稍有不同所致,这引起人们对两耳相关问题进行了大量研究,包括引起的神经电势。听觉的研究也是通向研究大脑的路。

3. 数字音响技术 目前高质量的录音放音系统、电子乐器等都已广泛使用数字编码技术,它用大规模集成电路与计算机技术来实现前所未有的高保真度和大的动态范围,并使价格不断降低。目前出现的数字盒式磁带录音机 DCC 和小型激光唱片系统 MD 具有极高的性能,使数字音响有了新的飞跃。有了数字信号处理很容易改变声学环境。现在实现人工混响已是很容易的事。用数字信号处理装置,可以消除本地房间的声学响应再加上良好的音乐厅或电影院的声学响应,就能使人在自己的居室中得到像置身音乐厅中听音乐的享受,这种设备现已有产品问世。

电子乐器和计算机音乐的出现为作曲家和演奏艺术开辟了新的创作天地。

### 三、关于今后发展的一些考虑

中国在声学研究方面有较强的基础,在物理声学、水声学、超声学、噪声控制和语言声学方

面的研究工作水平都比较高。去年九月在北京召开的第十四届国际声学会议较全面反映出了中国的实力。但从研究的广度和深度来说,有些学科和问题还比较薄弱,研究还不够深入,基础研究和应用基础研究方面得到的支持还不够。我国计算机、微电子学的落后,加上经费的限制,使我国科研机构的仪器设备水平和应用技术的现代化都与国外有相当的差距。

声学是一门应用性很强的物理学科。从一个方面,应用给声学带来巨大的生命力,使它在社会生活中起重要作用。而从另一方面说,它又不是单纯的技术,在发展应用的过程中必需充分重视和发展基础研究和应用基础研究,否则技术和应用的发展最终要受到限制。因此,今后必需对基础性研究和应用研究有适当的安排。

在学科方向上,从当前学科发展和社会需求的趋势以及我们的学科基础考虑,要加强对物理声学、水声学、超声学、噪声控制和语言声学的支持,使之能做出有国际水平的工作。从应用技术的角度看,许多都和数字信号处理有密切关系。因此在数字信号处理和有关大规模集成电路方面要投入大的力量,使今后声学研究发展有深厚的技术基础,声学的应用也就会发展得更快。