

近场声全息技术方法简介

高 旻

随着科学技术的不断进步和人民生活水平的不断提高,噪声已成为环境和产品评价的一项重要指标,军事、交通运输、航空航天、工程机械等领域如何降低噪声水平也成为一个倍受关注的课题。噪声控制需要从声源控制、传播途径控制和受者保护三方面进行,一般来讲,声源控制是噪声控制中最根本、最有效的手段,而主要声源的定位与识别也是噪声控制工程的关键问题。从声源方面入手控制噪声就是要正确识别和定位声源,获得声源的声辐射特性。近场声全息技术突破了传统上通过测量声源表面振速信息计算声场辐射特性方法的瓶颈,而将声辐射问题转化为逆问题来研究,从而可通过测量部分声场信息重建声源表面信息,根据重建信息预测整个三维声场的辐射特性,开展近场声全息技术研究对噪声和振动控制、声源识别与定位等具有非常重要的意义。

一、全息术与声全息术

20世纪40年代,全息术的概念最早出现于光学,是著名物理学家哈博(D. Gabor)1948年在改进电子显微镜时发明的,最初只限于光学领域。但实际上,前苏联早在1935年就做出了全息图的声学等

效图。1965年,李斯和帕特尼克斯对哈博提出的全息术进行了重要改进,他们让两束相干辐射波的平均传播方向不共线,解决了哈博全息术中存在的孪生像问题,并提出李斯-帕特尼克斯(Leith-Upatnieks)全息术。这种全息照相术的图像记录和显示方式与常规照相术不同:全息照相术记录一个由稳定参考光和被测物体的反射光线之间的干涉图像,通过光的衍射特性显示出被测物体图像;而常规照相术则将图像直接记录在胶片上。显然,常规照相术记录的实际上仍是二维图像信息,其三维效应是人脑想象出来的;而全息照相术通过捕获二维全息面上的信息重建真实的三维图像,因而可提供更多信息,便于更直观地观察、比较被测物体图像和实际物体。1952年,毅森等将全息术思想推广到X射线领域,瑟斯通在1966年又将全息术用于超声波研究。发展到今天,全息术的应用范围越来越广,诸如电子全息术、X射线全息术、光全息术、光电子全息术、微波全息术、声波全息术(包括常规声全息、近场声全息、远场声全息)等,由于全息术应用广阔,可用于进行场重建的非常直观的场研究方法,这些优点吸引了许多研究者。

1965年史密斯等人就开始用红宝石激光沉积法制备薄膜材料,但是由于受激光器性能限制,脉冲激光沉积法并未受到重视。直到1987年,Dijkkamp等人首次利用脉冲KrF准分子激光成功制备高质量高温超导薄膜YBCO(Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films),才使脉冲激光沉积法得到广泛关注和迅速发展。现在脉冲激光沉积法已用于制备复杂的多组分、多元素氧化物薄膜及其异质结、氮化物薄膜、碳化物薄膜、硅化物薄膜及各种有机物薄膜、有机-无机复合材料薄膜等,也可用于铁电薄膜、磁性薄膜、光电薄膜、非线性波导薄膜、合成纳米晶量子点薄膜的制备。脉冲激光沉积法在高温超导材料的研究中可用于制备YBCO等系列高温超导薄膜;在生物医学研究领域可用于制备生物陶瓷薄膜,提高医用合金材料或高分子材料表面的生物相容性。羟基磷灰石是一种生物活性陶瓷材料,化学成分为 Ca_{10}

$(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$,与生物骨组织中的磷酸钙无机物类似($\text{Ca}/\text{P} = 1.67$),组织细胞在其表面易于生长,具有很好的细胞相容性。但是,羟基磷灰石难以加工成型,利用脉冲激光沉积法把羟基磷灰石沉积在医用金属材料表面可提高其细胞相容性。类金刚石薄膜是一种生物惰性陶瓷材料,硬度很高、摩擦系数很小、化学稳定性和抗腐蚀性强,并有很好的血液相容性和细胞相容性。由于类金刚石薄膜的各种特性与薄膜中的 sp^3/sp^2 比值有关,因此可根据需要调整脉冲激光沉积参数沉积出具有特定功能的类金刚石薄膜,目前生物陶瓷薄膜已广泛用于人工心脏瓣膜、心血管支架、左心室辅助装置、人造心脏、髋关节、膝关节、植入人体的生物传感器和微电子机械系统(microelectromechanical system, MENS)等。

(安徽省合肥工业大学理学院 230009)

声全息术是声学研究中极其重要的技术之一，是利用干涉原理获得被观察物体声场全部信息(振幅分布和相位分布)的声成像技术，能利用声场空间一已知区域的声场特性预报另一区域的声场特性。早期声全息完全模仿光全息方法，即用一参考声束与频率相同的物体声束相干，在记录平面内得到全息图。用一束激光照射全息图，即可得到分别与 U_0 及 U_0^* 相应的两个像，称之为孪生像(U_0 为物体波、 U_r 为参考波、*表示共轭)。 U_0 真实反映原物体，称为真像(其实为虚像)， U_0^* 则为其共轭像(是实像)。声全息成像技术一般包括获得物体的声全息图和由声全息图重建物体可见像两个步骤。要构成声全息图，除含有待测物体信息的声波(物波)外，还需要另一束与物波相干的参考波，两者干涉形成既有振幅信息、又有相位信息的声全息图。为了获得物体的全息图，必须同时具备两束相干声波，一束照射物体并透过物体成为物波，另一束声波称参考波，物波和参考波在一定位置发生干涉，干涉图样就是物体声场的含有振幅和相位信息的声全息图(图1)。

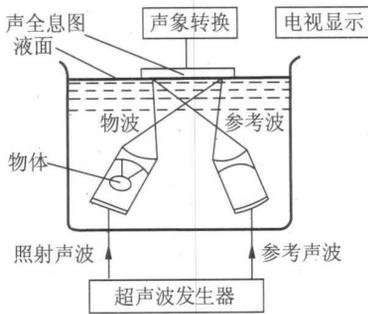


图1 声全息原理示意图

参考波一般用声波，有时也可用电信号模拟。若需要保存声全息图，通常把声全息图记录在底片上作为光调制器，需要时可随时用激光重建可见像；若不需要保留声全息图，可设法使声成像的两个阶段极快完成，这就是所谓实时重建。如果重建时所用照明波与形成全息图所用波束的波长相同，就如同光全息一样，重建像就是与原物完全相同的立体像。为了获得可见重建像，重建波束必须为可见光，而可见光波长与通常用来形成声全息图的声波波长相差数百倍，因此重建像有严重深度畸变，失去了三维成像的优势。早期声全息测量在距离源面几个波长之外进行，当波长较大时会丢失高频波成分，受波长限制，全息成像分辨有很大局限性。后来的声全

息技术一般采用扫描声全息的方法，这是一种灵敏的成像方法，采用一个尺寸小于 $1/2$ 声波波长的点接收器扫描声场的全息记录平面，获得每一点的相位和振幅信息。如果以此信号调制一同步扫描点光源，底片即感光得到一幅声全息图。扫描声全息也可不用参考声源，点接收器提供的物波信号可直接与超声波发生器提供的参考电信号相互叠加，然后输入显示器，这种方法不仅简单而且还有减少声干扰的优点。但是这种简单的单探头扫描声全息设备成像时间较长，只能观察静态目标，图2为扫描声全息装置结构示意图。

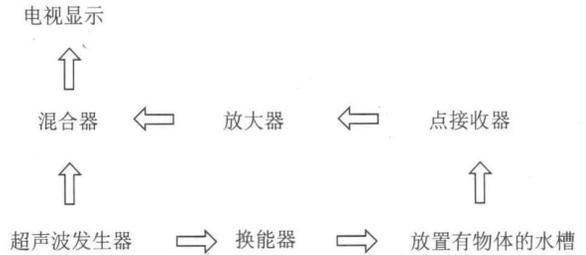


图2

声全息技术以辐射理论为基础可分为传统声全息技术和近场声全息技术，按成像距离的不同可分为常规声全息、远场声全息和近场声全息技术。

二、近场声全息术

原理与特点 全息接收面与物体的距离 d 甚小于声波波长 ($d \ll \lambda$) 时称为近场声全息 (NAH) 技术，它是上世纪 80 年代全息领域中脱颖而出的新技术，其出现对声全息技术的发展具有划时代意义。这种声全息场变换技术通过包围源的全息测量面做声压全息测量，然后借助源表面和全息面之间的空间场变换关系，由全息面声压重建源面的声场。近场声全息的理论基础是用于声辐射计算的亥姆霍兹积分方程 $\nabla^2 p(x, y, z) + k^2 p(x, y, z) = 0$ ，其中 $p(x, y, z)$ 为空间点的复声压、 $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ 为声波数、 c 为声速、 λ 为波长。在平面声全息条件下，由格林公式可解得 $p(k_x, k_y, z_H) = p(k_x, k_y, z_S) e^{ik_z(z_H - z_S)}$ 、 $p(k_x, k_y, z_H) = ck_v(k_x, k_y, z_S) e^{ik_z(z_H - z_S)} / k_z$ 。以上两式建立了波数域内全息面与重建面、预测面上的声压与振速之间的联系，对求得的波数域声学量作二维傅立叶变换即可得与其对应的空间域声学量。在柱面条件下令 $x = r \cos \theta$ 、 $y = r \sin \theta$ ，由分离变量法分解方程 $p(r, \theta, z) = p_r(r) p_\theta(\theta) p_z(z)$ ，可解得 $p_n(k_z, r_s) = [H_n^{(1)}(k_r r_s) /$

$H_n^{(1)}(k_r r_H) J_p(k_z, r_H)$, 其中 $H_n^{(1)}$ 表示 n 阶第一类汉克函数。上式中上标(1)换成(2)即可用来重建内辐射问题。

近场声全息不仅可识别和定位噪声源,也可预测声源在声场中的辐射属性,因而它既是比声强测量技术优越的声源定位技术,也是拥有常规声辐射计算功能的声场预测技术。近场声全息技术已广泛用于噪声源的定位与识别、特别是低频场源特性的判别、散射体结构表面特性以及结构模态振动等的研究,还用于源辐射功率和大型结构远场指向性预报等。实际中如果源尺寸较大,按照远场条件距离会很大,而且远场测量带来的多途效应、衰减、噪声等都会降低准确度。因而若能在近场条件下利用场变换推得远场的辐射场指向性等将有很大实用价值。此外,近场声全息是完全建立在声辐射理论(即声波的产生和传播理论)基础上的一种重要声源定位和声场可视化技术,它可为实际的噪声振动分析提供丰富的声源与声场信息,对于有效控制噪声源、研究噪声源的声辐射特性具有重要意义。近场声全息不仅可定位空间声源、分析声辐射能量的分布,还可提供其他的声场信息。而且声强测量技术中存在的近场效应误差、有限差分误差、相位不匹配误差等固有缺陷也决定了它在声源定位精度、适用范围等方面无法与近场声全息技术相比。

噪声与误差处理 任何实际的近场声全息系统在测量全息数据时,总会引起各种各样噪声信号与测量误差。例如环境噪声、测量系统的电噪声,接收阵元与通道的不一致性,有限的接收孔径,信号采样间距、量化精度不足等等。这些噪声与误差将随全息数据进入空间频率域及以后的处理过程,从而严重影响重建结果。对倏逝波而言,格林函数在反演运算过程中起着指数放大器的作用,即

$$G(m, n, z_0 - z_h) = e^{2(z_0 - z_h) \sqrt{m^2/L^2 + n^2/L^2 - 1/L^2}},$$

其中 $k_x^2 + k_y^2 > k^2$, 考虑到记录全息数据时,倏逝波成分经历了一个指数衰减过程。所以反演运算过程的这个指数放大器正好使其恢复到声源所在平面的“原始值”。但是测量全息数据时引入的噪声与误差并未经历传播过程中的指数衰减,在重建过程中却同样被指数放大,因此重建结果的信噪比大为降低,导致分辨率严重降低和重建结果不稳定。为提高近场声全息算法的稳定性与可靠性及其抗噪声干扰能

力,应在重建之前尽量滤去这些噪声,这就要求在空间频率域或波数域先进行滤波处理。虽然近场声全息变换计算可通过滤波提高变换精度,但近场声全息测量也难免受到干扰。测量系统误差及各种环境干扰都将因格林函数的奇异性,在源面场的重建中被放大而影响重建效果。一般来说,空间频率域滤波函数的选择主要根据倏逝波的指数衰减特性,即设法在尽量保留全息数据倏逝波成分的条件下滤除噪声。

在声全息变换技术研究中,全息测量的背景噪声干扰问题一直没有得到很好解决,结果只能在移除所有背景干扰之后或在消声室环境下进行全息测量,从而大大限制了其在工程中的应用。空间声场分离技术的出现突破了近场声全息的应用局限,在具有背景噪声的全息测量情况下,利用声场分离技术分离后的全息声压重建源面上和声场中的声学参量,消除背景噪声对全息变换结果的影响,从而得到满意结果,广泛用于全息面是平面、柱面或球面的各类全息技术。波数域内的欧拉公式及粒子振速的矢量叠加原理可建立起该技术的单全息面实现方法。该技术的突出优点是能够在存在背景噪声的全息测量中消除噪声对全息变换结果的影响。由于分离声场技术是在全息面上进行的,所以可用于全息面为平面、柱面或球面的各种类型全息技术。全息面的声场分离技术进一步拓宽了近场声全息技术的应用范围,声全息测量过程不再需要移除全息面某一侧的声源,从而降低了对工业测量的要求,对声全息技术进一步推向工程实践具有非常积极的意义。

三、近场声全息测量分析系统的发展及

目前存在的技术难题

随着近场声全息技术的发展,采用近场声全息方法进行分析的测量系统相继问世。宾夕法尼亚大学建立了可在空气和水中进行平面近场声全息测量的两套实验系统,威廉姆斯在美国海军研究所建立了一套水下自动扫描近场声全息测量系统,日本小野测器公司建立了一套近场声全息测量装置,美国密歇根大学还独立研制了一套适用于球面全息的测量系统。这些测量装置和系统主要迎合了实验测量的需求,没有走向实际工程应用。真正商业化的测量分析系统出现在 20 世纪 90 年代以后。目前,国际上主要的商业化的声全息测量系统如下。

B & K 公司的声场空间变换 (Spatial Transfor-

MEMS 生物传感器及其医学应用

张 鉴 戚昊琛

生物传感器是利用生物分子探测生物反应信息的器件,被列为新世纪五大医学检验技术之一,是现代生物技术与微电子学、化学等多学科交叉结合的产物。而微电子机械系统(MEMS)技术可在微米到纳米的尺度上制造固态传感器,并易与信息处理电路集成在一块芯片上,为生物微传感器实现小型化、便携式、低成本、高灵敏度的片上系统提供了有力技术支持。

特点及分类

MEMS 生物传感器由分子识别元件和信号转换器组成,分子识别元件即感受器,由生物活性物质

构成,直接接触待检测物质,具有分子识别能力,有的还能放大反应信号。现在识别元件已不仅仅限于生物活性物质,某些具有模仿生物分子识别功能的化学分子也用于构建识别元件。信号转换器就是换能器,属于电化学或光学检测元件,可将生物识别事件转换为可检测的信号。被分析物中的特异性待测物与分子识别元件结合后产生的复合物、光、热等,就被信号转换器转变为电信号或光信号等送出并经显示处理,进行分析监测。

MEMS 生物传感器与传统物理、化学传感器的最大区别在于,其中含有生命物质,以生物活性单元

mation of Sound Fields,简称 STSF)分析系统 它是在多参考源声场空间变换技术的基础上开发建立的。声场空间变换分析软件具有以下用途:给出有功和无功声强、质点速度、声功率以及声压的高分辨率声源定位图像,辐射声场的三维可视化,通过近场测量计算声场中任意点处的声压谱,声源贡献分析,发动机和齿轮箱测试,轮胎路面噪声分析,整车噪声分析,风噪声分析。由于 B & K 提供了包括扫描装置、测量装置、数据采集装置及分析软件的完整系统,因而实际工程中应用较为广泛。现在声场空间变换分析软件不仅可分析稳态声场,而且通过增加一个时域分析的手段还可直接分析非稳态噪声源,进一步拓宽了近场声全息的实际应用范围。2001 年利用稳态声场的分析功能对摩托车刹车尖锐噪声进行了声源定位分析,根据分析结果改进了刹车片,取得了良好效果。

由 LORHA 主持并和 METRAVIBRDS 合作开发的 NITS Sound Explorer 测量分析系统 它可以测量汽车的内部声场,对汽车各开口处噪声泄漏的分析可与风洞媲美。目前该系统的主要功能有:汽车内部噪声源定位和噪声泄漏分析,各初始面(如车门、挡风玻璃、车顶棚等)上的声能量分布,所有初始面在车厢内的声能量辐射重建,驾驶员和乘客耳边的声压预测,对汽车作局部修改、预测其对声场的影响范围。这款软件主要适用于分析汽车噪声。

无论测量系统怎么改变、功能怎样强大,都主要

由测量装置和分析软件两部分组成。目前的所有分析软件大都采用二维空间傅立叶变换法实现全息变换,且前端测量采集装置大多采用传感器阵列测量法。虽然上述作为近场声全息核心的全息变换方法具有多种形式,但是二维空间傅立叶变换及其逆变换方法仍是最简单、最方便的一种。

近场声全息建立以来,一直面临几个关键技术难题:如何使近场声全息适用于宽带声源和部分相干场,如何保证近场声全息算法的稳定性与可靠性,如何使平面近场声全息适用于其他生源面的声全息变换,以及全息测量面上存在反射声压的问题、多个相干光源同时存在时的声场重建问题等等。虽然近 20 年来近场声全息技术研究取得了很大进展,而且国外已推出相应的近场声全息测量系统,但是国内近场声全息的理论研究(尤其是推广应用方面)仍然存在许多亟待解决的问题,近场声全息的算法研究基本处于跟踪研究阶段,成果也多是在实验室或较为理想的条件下得到的,真正意义上的工程应用并不多见。除重构算法理论和全息测量方法有待完善之外,近场声全息测量和重构中的误差问题也尚未解决。所以需要进一步加大声全息技术(特别是近场声全息技术)的研究力度,开发精确的实用技术,扩大工程中的应用范例,促进真正意义上的推广和应用。

(湖南省长沙市国防科学技术大学 410073)