

# 声全息技术的研究现状与展望

周广林<sup>1,2</sup>, 陈心昭<sup>1</sup>, 陈剑<sup>1</sup>, 毕传兴<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230009;

2. 黑龙江科技学院机械工程系, 黑龙江鸡西 158105)

**摘要:** 简单地回顾了全息术的基本原理, 全息术的应用范围及发展历史。对声全息技术进行了分类, 并对各类声全息技术的特点进行了评述, 就近场声全息技术(NAH)中常用的各类重建计算方法及适用范围、声全息数据的各类采集方法、特点及声全息成像的分辨率、各类声场全息图像的表达式等问题的研究现状进行了详尽的分析, 并重点分析了基于声压测量的近场声全息技术和基于声强测量的近场声全息技术(BAHIM)的研究现状, 从而指出了这两种近场声全息技术有待进一步深入研究的问题, 并对 NAH 及 BAHIM 技术发展前景进行了展望。

**关键词:** 声全息测量; 声压; 声强; 近场; 空间声场变换

**中图分类号:** TB52<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

## Review and outlook of researches on acoustical holography

ZHOU Guang-lin<sup>1,2</sup>, CHEN Xin-zhao<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, BI Chuan-xing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanic and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Heilongjiang Institute of Science, Jixi Heilongjiang 158105, China)

**Abstract:** The basic theory and development of acoustical holography are reviewed in this paper. Acoustical holographic techniques are classified, and their features are discussed. A number of aspects including widely used calculation methods of near-field holography (NAH) and the scope of their applications, data acquisition methods, resolution of holographic images, and representative methods of acoustical holography are analyzed. The paper emphasizes the present status of NAH based both on sound pressure measurement and sound intensity measurement. Finally, existing problems requiring further studies of these two types of NAH are pointed out, and a preview of the future development is provided.

**Key words:** acoustical holography measurement; sound pressure; sound intensity; near-field; spatial transform of sound field

## 1 前言

全息术是为了记录和显示图像而把干涉理论和衍射理论综合起来的一门学科技术。应用干涉理论是为了记录全息图, 应用衍射理论用于显示图像。

全息术是著名物理学家 D. Gabor 在 1948 年从事电子显微镜的改进工作时发明的<sup>[1]</sup>。但实际上前苏联的 S. J. Soklov 早在 1935 年就制出了全息图的声学等效图<sup>[2]</sup>。由于 Gabor 全息照相术可作为一种显示不可见辐射的方法, 许多学者都进行全息术

应用的研究。1952 年, Ei-sum 等将全息术的思想推广到 X 射线领域<sup>[3]</sup>, Thurstone 在 1966 年又将全息术应用到超声波的研究中<sup>[4]</sup>。

全息术发展到今天应用范围越来越广, 诸如电子全息术<sup>[5~7]</sup>、X 射线全息术<sup>[3,8,9]</sup>、光全息术<sup>[10~12]</sup>、光电子全息术<sup>[11]</sup>、微波全息术<sup>[11]</sup>、声波全息术(包括常规声全息<sup>[13,14]</sup>、近场声全息<sup>[15,21,35]</sup>、远场声全息<sup>[16,17]</sup>)等, 可以说只要这些波有足够的相干性, 足以形成所需要的干涉图形, 就能使用全息术来研究。有些方法连相干性都不要, 所以, 全息术是一种应用广阔的、可用来进行场重建的非常直观的场研究方法。

## 2 声全息技术的分类

### 2.1 常规声全息

收稿日期: 2001-11-19; 修回日期: 2002-10-31

基金项目: 安徽省自然科学基金资助课题(00047418)

安徽省十五科技攻关课题(01012002)

作者简介: 周广林(1961-), 男, 吉林省怀德县人, 教授, 在职博士生, 主要研究方向: 近场声全息技术及声强测量技术。

在常规声全息中,全息数据是在被测物体的辐射或散射声场的 Fresnel 区域或 Fraunhofer 区域(即全息接收面与物体的距离  $d$  远大于波长  $\lambda$  的条件下)采用光学照相或数字记录设备记录的。它只能记录空间波数等于和小于  $2\pi/\lambda$  的传播波成分,用一个适当的光源照射全息图或通过计算变换获得反应声场分布的三维重建图像,重建像的分辨率受限于声波波长<sup>[18,19]</sup>。对于小孔径阵,其两点定位横向最小分辨率不小于半个波长,而径向分辨率更差<sup>[19]</sup>。全息图只能正对从源出来的一个小立体角,因此,当声源辐射场具有方向性时,可能丢失声源的重要信息,并且通过声压记录的全息图,只能用于重建声压场,而不能得到振速、声强等物理量。为了提高精度,可以采用声光全息,然而光全息带来了设备的复杂性。

## 2.2 近场声全息

针对这一问题,80年代初,由 E. G. Williams 等首先提出的近场声全息技术 NAH(near-field acoustic holography)是一种新的成像技术,是全息成像理论的推广和突破。NAH 是在紧靠被测声源物体表面的测量面上记录全息数据,然后通过变换技术重建三维空间声压场、振速场、声强矢量场,并能预报远场指向性<sup>[15,20]</sup>,由于是近场测量,所以除记录了传播波成份外,还能记录空间频率高于  $2\pi/\lambda$  随传播距离按指数规律迅速衰减的倏逝波(evanescent wave)成份,由于它含有振动体细节信息,所以理论上便可获得不受波长  $\lambda$  限制的高分辨率图像,测量覆盖了从源出来的一个大的立体角,有指向性的源能够被不失信息地检测出来。NAH 已被广泛用于噪声源的定位与识别<sup>[21]</sup>,特别是低频场源特性判别,结构振动的声辐射<sup>[22]</sup>、声散射<sup>[23,27]</sup>研究等。

## 2.3 远场声全息<sup>[16,17]</sup>

这种方法通过测量离声源很远的声压场来重建表面声压及振速场,由此预报辐射源外任意一点的声压场、振速场、声强矢量场,由于观察点离声源很远,声源表面场和观察点声压的关系可以大大简化,因此和 NAH 相比,远场声全息具有计算简单的特点。另外这种方法计算的声强直接反映了辐射到远场的贡献,因此便于识别到远场有贡献的声源。但远场记录不到倏逝波成份。因此和常规声全息一样,分辨率受声波波长的限制,不适宜高分辨率的场合。但适合于对运动火车、汽车等尺寸较大的物体进行噪声识别。

比较以上三种声全息技术,NAH 适用面最广,声学技术

分辨率最高,可操作性最强,所以近些年,国内外对 NAH 研究相当活跃<sup>[15,21~35]</sup>,从 80 年代末开始的几届美国声学会议上,NAH 都作为一个单独的讨论专题,并已作为一个技术门类列入了 PACS 分类方法,这充分说明了 NAH 影响之广。T. Loyau 等人于 1988 年提出了基于声强测量技术的宽带声全息方法 BAHIM(broadband acoustical holography based on intensity measurement)<sup>[36,37]</sup>,何元安、何祚镛等在这方面也做了很有成效的工作<sup>[38~40]</sup>,蒋伟康、高田博开发了近声场综合试验解析技术<sup>[41]</sup>。使得 NAH 技术日趋完善。

## 3 NAH 常用的算法

### 3.1 共形面算法

E. G. Williams 等提出由近场测量的平面声压全息图重建源平面上声压和法向振速的 NAH 技术,研究了平板的振动和声辐射,并在空气和水中进行了实验研究<sup>[15,20,21,25]</sup>,全息图上的声压可以表示成源面上的声压和源面上满足 Dirichlet 边界条件的 Green 函数的卷积,声场重建过程为这个卷积的解卷过程。借助于 Fourier 变换技术可以实现从全息面到源面的声场重建。由于在平面声全息的实施时常借助于 FFT 算法计算,所以称为 FFT 算法。这种方法比较容易推广到源表面为其它正交坐标面(如球面柱面)且全息面与源表面共形情况<sup>[24,34]</sup>。

根据 Fourier 变换方法重建声场结果表明,重建过程具有不稳定性,计算结果是不稳定的。为了得到稳定解,提高分析精度,H. Feischer 等采用维纳滤波来解决这一问题<sup>[42]</sup>。但这一方法的前提是已知信号及噪声功率谱密度,实际情况多数难以办到。所以,W. A. Veronesi 等提出在空间频域加窗函数的办法<sup>[25]</sup>,且其仅与采样间距及波数有关。此方法在采样间距非常小的时候是有效的,但随着采样间距的增大,其效果会变得非常差。为此,张德俊等提出一种带约束条件的最小均方误差意义下的空间频域的滤波处理<sup>[33]</sup>。该窗与信噪比及测量距离有关,随着噪声水平和测量距离的增大,滤波程度加强,从而能更有效地抑制噪声影响和保存倏逝波成份。

文献[43,44]进一步将 NAH 推广到轴对称几何体的情况。在这种情况下,可将源表面沿轴向分成许多小环,在每个小环上假定振速沿轴向分布均匀,而周向则可按圆周波数分解。通过这种方法可以得到联系全息面上任一点声压和源表面振速展开系数的关系式,然后利用最小均方误差求得表面振

速展开系数。此处理技术要求全息面与源表面是共形的。

### 3.2 非共形面算法

尽管当全息面和重建表面共形时能获得较好的重建效果,但在实际应用中除了所研究的表面为特殊的表面(如平面、圆柱面、轴对称面)外,测量和源表面共形的全息面上各点声压是非常困难的,因此,研究非共形面 NAH 是完全必要的。

#### 3.2.1 常数单元法

文献[45]首先提出了可以实现任意形状声源重建的方法。首先将原表面用一系列小平面对近似表示,并假定每个小平面上的声源和振速是均匀的,然后将表面 Helmholtz 积分方程和外部 Helmholtz 积分方程离散化,得到联系全息图上测点声压和源表面上各个小源面法向振速的方程组,解之便可得到法向振速分布,并进一步应用表面 Helmholtz 积分方程和外部 Helmholtz 积分方程求得源表面上的声压分布和源外任一点的声压和振速分布。利用 CHIEF 方法解决在本征频率上解的不唯一性问题,并利用奇异值滤波技术改善重建结果的不稳定性。

#### 3.2.2 边界元法

采用边界元法 BEM(boundary element method)替代上述的常数单元法,可以大大提高任意形状声源重建的精度,文献[46]表明,当源表面和全息面之间的距离较近时,重建过程采用 Gauss 消去法解方程组即可满足要求;当源表面和全息面之间的距离较远时,必须采用奇异值滤波技术。

提高全息面和源表面非共形情况下的全息重建精度除了采用 BEM 法外,还需合理选择全息面,文献[47]以源表面为球面情况为例,对非共形面 NAH 进行了研究,结果表明,尽管采用了 BEM 技术,但在全息面为单平面时仍不能获得理想的重建结果,而当全息面选为位于声源两边的双平行面时,则可得和共形面全息重建相近似的重建精度。文献[40]将基于 BEM 的 NAH 方法和 BAHIM 技术相结合,使之适用于宽带情况。此方法能很好地适用于工业噪声源的识别和定位。

利用边界元法研究声场时,在特征频率处存在着解的非唯一性问题。由 Schenck 提出的 CHIEF 法<sup>[48]</sup>和 Burton、Miller 提出的 Burton&Miller 法等<sup>[49,50]</sup>已成为较有代表性的方法。但 CHIEF 法难以选择有效的 CHIEF 点,Burton&Miller 法法向求导时会产生超奇异积分,处理十分繁杂。王有成、陈心昭提出了边界元技术中的全特解场方法<sup>[51,52]</sup>(边

界点法),此法在声辐射计算中得到了成功的应用<sup>[52,53]</sup>。

#### 3.2.3 最小均方误差法

基于 BEM 的 NAH 法的一个缺点是当声源表面的尺寸远大于波长时,表面网格单元数很多,计算量大,因此 ZhaoxiWang 和 S. F. Wu 提出了 Helmholtz 积分方程最小均方误差法(HELs)<sup>[54,55]</sup>。这种方法将声场近似表示成为一组在声源表面上正交函数系的线性迭加,然后利用最小均方误差准则,由测量点声压数据求解迭加系数。此法在原理上对全息面的形状没有限制。由于展开项的数目往往远小于 BEM 方法中表面网格的节点数,因此和基于 BEM 的 NAH 方法相比可以大大节省运算时间,HELs 方法实施的关键是正交函数系的构造。文献提出了用球坐标下的正交函数系作为基函数,用 Gram-Schmidt 正交归一化方法构造在源面上满足正交归一性质的函数系。这样构造的函数系对于源面为球面时最佳,而对于源面为长形情况则收敛较慢。

## 4 声全息数据采集方法

声全息技术的关键是获得全息测量面上多点的复声压,即声压的幅值及声压的相位。获取复声压的方法有两大类,即快照法和逐点扫描法。

### 4.1 快照法<sup>[20,41,56~60]</sup>

快照法(snapshot method)由 Maynard 提出。以多个传声器阵列组成平面接收阵,一次测量完成全息面上复声压数据的采集。文献[41]用 76 个话筒在全息面上分 6 次测量,共测量 456 点的声压,此法也称稀疏阵分组移动采样方法,文献[56]用  $8 \times 8 = 64$  个传声器在全息面上组成方阵采集数据。1975 年美国海军海洋系统中心研制了 AIS( $48 \times 48$ )阵元数的水下观察方阵系统<sup>[60]</sup>;1976 年日本研制了 OKI( $32 \times 32$ )阵元数的声全息水下观察多波束方阵系统<sup>[58]</sup>;1979 年中科院武汉物理所研制了  $64 \times 64$  阵元数的声全息水下观察方阵系统<sup>[59]</sup>。

此法特点是采集的数据精度高、速度快、不要求噪声源具有相干性,对声信号瞬变系统非常适用。但由于快照法需要传声器多,且需要大量的校准工作,测量系统成本高。

### 4.2 逐点扫描法

逐点扫描法(single-scanning microphone method)。这类方法按扫描时所测量的参数可分为两种,即声压扫描和声强扫描。按照实验系统中各装置的移动形式可分为三种,即接收器扫描;声源扫

描和两者同时扫描。

#### 4.2.1 接收器扫描<sup>[26,28,33,57,61,62]</sup>。

按传声器数目有单传声器、双传声器及多传声器线阵扫描。单传声器分别沿 X 轴方向及 Y 轴方向(全息平面上)扫描<sup>[21,63]</sup>,同时需要一个参考信号,以便与声源保持一定的相位关系;双传声器沿 X 轴方向及 Y 轴方向扫描,主要应用于声强测量的宽带声全息重建技术(BAHIM)<sup>[36~38]</sup>,哈尔滨工程大学研制出我国第一套水下双通道声强测量系统及自动控制扫描装置,并改进成双水听器线阵水声声强测量系统<sup>[39]</sup>,以球形压电换能器作为声源,对声场进行全息重建<sup>[38,61]</sup>。扫描装置的控制、信号采集、信号传输与处理都由一台微机来完成,声强探头的定位、扫描速度、步距、方向、行程等参数都在微机中预先设定,实现自动扫描测量;多传声器线阵扫描<sup>[28,31,32,44]</sup>是基于声压或声强测量技术,沿着线阵的垂直方向一次或分多次扫描。在 NAH 的测量中,一般需要与源有关的参考信号;而 BAHIM 测量不需要参考信号,故很适合宽带噪声源的测量分析。

中科院武汉物理研究所研制出国内第一套在空气中使用的线阵扫描 NAH 实验系统,并对圆钢板<sup>[32]</sup>和编磬振动进行了全息重建<sup>[26,62]</sup>。线阵选用 32 个驻极体传声器,组成稀疏排列的直线阵,测量距离一般取  $d = 200\text{mm} \sim 700\text{mm}$ ,以保证能有效地接收到倏逝波成分,该系统当辐射频率为 400Hz 的空气声、测量距离  $d = 40\text{mm} \sim 60\text{mm}$  时,信号幅度的相对误差  $< 3\%$ <sup>[26]</sup>,基本不影响重建结果。

文献[29]为了测定诸如汽车等大型机器存在较多独立的噪声源时,采用分离奇异值的办法来确定独立的声源数,用近场声全息方法进行声场重建,它的实验装置采用近场和远场同时测试的装置,在近场全息面适当的位置上布置 3 个传声器来测定声压(距声源 120mm),在远场采用四角布置 4 个传声器测定声压,距声源 500mm。

#### 4.2.2 声源扫描

根据天线理论中源与接收器的互易原理,A. F. Metherell 等提出接收器与声源的互换<sup>[64]</sup>。文献[30]研究汽车轮胎产生的噪声时和文献[65]用半球面声全息法研究声场的声全息时都采用声源扫描的办法。这主要是在常规声全息中使用。

#### 4.2.3 接收器与声源同时扫描<sup>[19,66,67]</sup>

可以考虑两种扫描方式,一种方式是让声源与接收器实际地沿着空间一条轨迹扫描,另一种方式是让源阵和接收器阵的阵元顺序接通。并且可以证

明<sup>[19]</sup>,声源与接收器同时扫描时,其分辨率为单一扫描时的两倍。

## 5 声全息成像的分辨率

全息图分辨率为全息图中最细条纹的相位还未发生倒转时一个物点可以移动的距离<sup>[68]</sup>。常规声全息成像,都是在较远场进行的,源像的分辨率取决于波长。对于小孔径阵,根据 Rayleigh 分辨率判据,全息成像分辨率依赖于声波波长、成像距离、记录声场全息数据的孔径形状及有效尺寸<sup>[19,56]</sup>,其纵向(径向)分辨率低于横向分辨率<sup>[19,56,65]</sup>。文献[69]提出了采用脉冲波进行声全息成像,短时间的脉冲本身有利于将不同空间位置的散射体回波从传播时间上区分出来,同时由于任何脉冲波均可分解为多种频率成份,这些频率成份对重建均有贡献。将重建结果适当处理并有效地迭加起来,其分辨率更高。文献[69]的研究发现,空间某一位置散射点的脉冲经重建后,相位随空间位置呈线性变化,且变化程度比幅值敏感得多。这一重要性质可以作为一种相位识别处理技术。在某种情况下还可采用解卷处理,从而大大地提高了重建图像的分辨率,特别是纵向分辨率。

NAH 具有常规声全息无法达到的分辨率。但它对声全息数据测量精度的要求也远较常规声全息严格。文献[22]给出了平面 NAH 情况下重建场分辨率的表达。指出分辨率与测量面到振动面间的距离、声波波长、测量面上测得的声全息数据的最大幅值、声全息面上误差的最大幅值有关。

由于对 BAHIM 的研究还远不如对 NAH 的研究,至今没有见到 BAHIM 重建分辨率的表达式,但从文献[36,39]中看出,BAHIM 同 NAH 一样,也具有相当高的分辨率。

## 6 声场全息图像种类

为了使得重建的声场更形象化、可视化,一般都采用图像表达声场的办法。声全息图像主要分两类:即常规声全息图和 NAH 图。

### 6.1 常规声全息图<sup>[19]</sup>

#### 6.1.1 Fresnel 全息图

这类全息图由两个共线辐射束产生干涉图样,当一束辐射是球面而另一束辐射是平面时,就能得到 Fresnel 全息图,它是 Gabor 全息图的另一种叫法。

#### 6.1.2 Fraunhofer 全息图

它也是由两个共线辐射束产生的干涉图样,但图是在两束辐射之一束的物体远场或 Fraunhofer 区内记录的,由于孪生像离待摄像很远,不会产生很大的噪声和干扰,所以它比 Fresnel 全息图好。

### 6.1.3 偏置全息图

它首先由 E. N. Leith 和 J. Vpatnieks 提出,让两个干涉束不共线,使两个孪生像完全分离,可分为偏置 Fresnel 全息图和偏置 Fraunhofer 全息图。

### 6.1.4 Fourier 变换全息图

它是平面波与目标的空间 Fourier 变换之间的干涉图样,有几种方法可获得物体的空间 Fourier 变换,最常用的有两种方法:一是将观察平面移到物体的远区;另一是模拟地将物体移到远区,可把物体放在透镜的焦面上,这样的全息图只重建出物体 Fourier 变换,而不能直接重建出物体的像,若重建像,必须在衍射场里增加一个透镜,可以认为是一次逆 Fourier 变换。

### 6.1.5 聚焦像全息图

它是两个非共线辐射束的干涉图样,是在物体的近区记录的,这类全息术主要应用于液面声全息的研究中。

## 6.2 NAH(包括 BAHIM)图

以上几种都属于常规声全息成像方法,是在较远场进行的。NAH 通过包围源的全息测量面作声压或声强全息测量,然后借助于源表面和全息面之间空间声场变换关系,由全息面的声压或声强重建源面的声场。利用声全息场的空间变换,只需要二维场的全息测量,就可推算三维场;由全息面的无向量场,就可得声强向量场分布,并可确定大型复杂结构或振源声能输出部位及源的近场能量的回流图形。NAH 图主要是反映全息场重建后的一些声学量(诸如声强、声压、振速等)分布图,表示方法主要有三维分布图<sup>[31,62]</sup>、等值分布图<sup>[41,65]</sup>、空间向量声强分布图<sup>[26,27]</sup>、三维分布断面曲线图<sup>[32]</sup>、远场指向性图<sup>[15,20,27,38]</sup>等。

## 7 声全息技术的展望

(1) NAH 技术在声源特性研究上是一种非常有效的研究方法,尤其是 BAHIM 技术,它不需要了解激励源及与之有关的参考信号,可以在很宽的频带范围内研究声源特性,在工程上具有很高的应用价值。

(2) NAH 技术无论是对空气中还是水下大型或复杂结构的振动和噪声的辐射特性研究、主要声

源的分析与计算都是一种极为有效的方法,有助于对结构振动、噪声的有效控制。

(3) 应用 BEM 技术可进行声全息非共形面声场重建,特别适合低频大尺寸结构的声特性研究。基于 BEM 或边界点法的 NAH 技术及源分离技术,可以由近场测量精确重建源表面场,进而可以推算远场声学特性,为机械设备低噪声设计与研究提供了稳固的技术基础。

当然 NAH 或 BAHIM 技术所取得的成就并不能掩盖其需要解决的问题。

(1) 国内的 NAH 或 BAHIM 技术所取得的成果多是在实验室或较为理想的条件下取得的,真正意义上的工程应用并不多见,所以需要进一步加大研究力度,开发精确而实用的技术,扩大在工程中的应用范例,以期待真正意义上的推广应用。

(2) 声全息测量面上测量数据的获取还存在着不容忽视的问题。快照法虽然测效高,但由于需要传声器多,测量系统造价太高,而常规意义下的扫描法<sup>[38]</sup>,实质上还属于离散点法测量,无论是基于声压还是基于声强测量,测效都很低,需长达数小时的时间,在这么长的时间里,声源的辐射特性早已变化,特别是 NAH 测量,由于还需要能反映声源特性且不受干扰的参考信号,测量过程中保持长时间稳定,而又符合要求的参考信号难以找到,导致测量精度难以保证,故期待着真正意义上的快速连续扫描。

(3) 无论是基于声压测量的单传声器还是基于声强测量的双传声器,现在还需要沿 X 和 Y 轴分别扫描,影响测效,由于二次扫描时存在探头空间位置误差(尤其是方向误差),影响测量精度。可否一次扫描完成 X 和 Y 两个方向的快速扫描测量? 如何设计这样的测量探头? 扫描路径如何确定? 采样间距、全息面位置如何选择? 这些因素对测量精度影响怎样? 都有待进一步研究。

(4) 由于声学逆问题原理中的不稳定性,基于 BEM 法的 NAH 重建结果对于全息面的不同选择是敏感的,即存在着重建过程中的积分奇异值问题。这必将影响测量精度,有待改进。

### 参考文献:

- [1] Gabor D. A new microscope principle[J]. Nature, 1948, 161:777-784.
- [2] Sokolov S J. Ultrasonic oscillations and their applications [J]. Tech, Phys. U. S. S. R, 1935, 2; 522-528.
- [3] Ei-sum H M A, Kirkpatrickp. Microscopy by reconstructed wave fronts[J]. Phys. Rev, 1952, 85; 763-771
- [4] Thurstone F L. Ultrasound holography and visual recon-

- struction. proc. symp[J]. Biomed. Eng, 1966, 1:12-21.
- [5] 陈建文等. 电子全息术的两次曝光法[J]. 中国激光, 1987, 14(1):24-26.
- [6] 吴自勤等. 电子全息术及其应用[J]. 物理, 1987, 16(2):723-726.
- [7] 寇雷刚等. 电子全息术[J]. 物理学进展, 1995, 15(4):329-390.
- [8] 彭惠民. X射线激光全息术[J]. 物理, 1992, 22(5):275-280.
- [9] 陈建文. X射线全息术[J]. 物理学进展, 1995, 15(2):125-147.
- [10] Rogers G L. Experiments in diffraction microscopy[J]. Proc. Roy. soc(Edinburgh), 1952, 63A:193-198.
- [11] 科利尔 R J, 伯克哈特 C B, 林 L H. 光全息学(中译本)[M]. 北京:机械工业出版社, 1983. 28-35.
- [12] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wave fronts and communication theory[J]. J. Opt. Soc. Am., 1962, 52:1123-1231.
- [13] Metherell Hussein A F, Ei-sum H M A. et al. Introduction to acoustical holography[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1967, 42(4):733-742.
- [14] Sadayuki Ueha, Makoto Fujinami et al. Imaging of acoustic radiation sources with acoustical holography[J]. Optica Acta, 1976, 23(2):107-114.
- [15] Williams E G. Sound source reconstructions using a microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1980, 68(1):340-344.
- [16] Williams E G. Imaging the sources on a cylindrical shell from far-field pressure measured on a semicircle[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1996, 94(4):2022-2032.
- [17] 杨殿阁等. 用于噪声识别的声全息重建方法的研究[J]. 声学学报, 2001, 26(2):156-160.
- [18] Greece D C. Use of acoust holography for the Imaging of sources of radiated acoustic intensity[J], 1969, 46(1):44-45.
- [19] 希尔德布兰德 B P. 声全息导论(中译本)[M]. 北京:科学出版社, 1978. 79-85.
- [20] Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Nearfield acoustic holography: I. theory of generalized Holography and the development of NAH[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1985, 78(4):1395-1413.
- [21] Williams E. G, Dardy H. D. Nearfield acoustical holography using an underwater acoumated scanner[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1985, 78:789-798.
- [22] Villot M, chaveriat G, Roland J. Phonoscopy: An acoustical holography technique for plane structures radiating in enclosed spaces[J]. J. Acoust. soc. Am, 1992, 91(1):187-195.
- [23] 暴雪梅, 何祚镛. 近场声全息方法研究目标散射场[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1997, 18(10):15-19.
- [24] Williams E G, Dardy H D. Generalized nearfield acoustical holography for cylindrical geometry and experiment[J]. J. Acoust. Soc Am, 1987, 81(2):389-407.
- [25] Veronesi W A, Maynard J D. Nearfield acoustic holography(NAH) II: holographic reconstruction algorithms and computer implementation[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1987, 81(5):1307-1322.
- [26] 张德俊等. 近场声全息对振动体及其辐射场的成像[J]. 物理学进展, 1996, 16(3-4):613-623.
- [27] 暴雪梅等. 目标散射场全息重建方法研究[J]. 声学学报, 2000, 25(3):254-264.
- [28] 高田博, ほか2名. 近距離音場ホログラフイー法に關する研究. (室内の音源把握のために擴張)[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1995, 61(4):1496-1502.
- [29] 高田博, ほか2名. 近距離音場ホログラフイー法に關する研究(特異値分解にする基準信號の選擇)[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1995, 61(4):1503-1508.
- [30] 高田博, ほか2名. 近距離音場ホログラフイー法に關する研究. (ARMAモデルにする基準信號の選擇)[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1995, 61(7):3008-3013.
- [31] 高田博, ほか2名. 近距離音場ホログラフイー法に關する研究(多數の獨立な音源が存在する音場の再生)[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1995, 61(5):1955-1961.
- [32] 张德俊等. 振动体及其辐射场的近声全息实验研究[J]. 声学学报, 1995, 20(4):250-255.
- [33] 张德俊等. 近场声全息成像方法的研究[J]. 声学学报, 1992, 17(6):436-445.
- [34] Williams E G, Houston B H, Bucaro J A. Broudband nearfield acoustical holography for vibrng cylinders[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1989, 86(2):674-679.
- [35] Kang S C, Ih J G. The use of partially measured source data in enar-field acoustical holography based pn the BEM[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2000, 107(5):2472-2473.
- [36] Loyau T, Claude J Pascal. Broadband acoustic holography reconstruction from acoustic intensity measurements I: principle of the method[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1988, 84(5):1744-1750.
- [37] Mann J A, Claude J Pascal. Locating noise sources on an industrial air compressor using broadband acoustical holography from intensity measurements(BAHIM)[J]. Noise Control Engineering Journal, 1992, 39(1):3-12.
- [38] 何元安等. 基于声强测量的近场声全息及其在水下声源声辐射分析的应用[J]. 声学学报, 1996, 21(4):297-305.
- [39] 何作镛等. 双水听器水声声强测量系统的误差分析和校准[J]. 声学学报, 2000, 25(3):235-241.
- [40] 暴雪梅. 宽带, 以边界元为基础的非共形全息声场变换方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学硕士论文, 1996.
- [41] 蒋伟康等. 声近场综合试验解析技术及其在车外噪声分析中的应用[J]. 机械工程学报, 1998, 34(5):76-84.
- [42] Fleischer H, et al. Restoring an acoustic source from prssure data using wiener filtering [J]. Acoustica, 1986, 60:172-180.
- [43] Borgiotti G U, Sarkissian A, Williams E G, Schurtz L. Conformal generalized near-field acoustic holography for axisymmetric geometries[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, 88(1):199-209.
- [44] Sarkissian A. Near-field acoustic holography for axisymmetric geometries[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, 88(2):961-966.
- [45] Hald J, Ginn K B. Uehicle noise investigation using splotial trans for mation of sound fields[J]. Sound and Vibration, 1989, 4:38-45.
- [46] Bai M R. Application of BEM (boundary element method)

(下转第 129 页)

- [7] 谷嘉锦. 高声强次声和低频声的研究[J]. 噪声与振动控制, 1999, 19(2): 6-8.
- [8] 黄其柏. 家用电器次声及其声辐射特性的研究[J]. 噪声与振动控制, 1997, 17(5): 6-8.
- [9] 任引津. 职业病学进展(第二卷)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1986. 177-183.
- [10] Slarve RN, Johnson DL. Human whole-body exposure to infrasound[J]. Aviat Space Environ Med 1975, 46(4 Sec 1): 28-31.
- [11] 刘文魁, 蔡荣泰. 物理因素职业卫生[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 86-89.
- [12] 方丹群, 王文奇, 孙家麒. 噪声控制[M]. 北京: 北京出版社, 1986. 417-421.
- [13] 朱之犀, 黄振华, 陆柳. 声激波降噪研究[J]. 声学学报, 1993, 18(4): 272-279.
- [14] 赵红武, 孙晓峰. 可控声阻抗声衬控制系统设计及实验研究[J]. 声学学报, 1998, 23(5): 430-438.
- [15] 庄洪春. 对低频声波的吸声体[J]. 声学学报, 1991, 16(6): 415-426.
- [16] 李峰. 具有低频衰减性能的粘弹阻尼材料[J]. 噪声与振动控制, 1997, 17(5): 39-40.
- [17] Ping Sheng. locally resonant sonic material[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [18] 汤家骥. 次声武器杀伤因素的生物学效应及防护[J]. 人民军医, 1995, 5(总第 426 期): 4-6.
- [19] A. F. Ryan. protection from noise-induced hearing loss by prior exposure to a nontraumatic stimulus[J]. Hearing research, 1994, 72(1): 23-28.
- [20] Ger P. Acquired resistance to acoustic trauma by stand conditioning is primarily mediated by changes restricted to the cochlea, not by systemic response[J]. Hearing research, 1999, 127(1): 31-40.

(上接 125 页)

- based acoustic holography to radiation analysis of sound sources with arbitrarily shaped geometries[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1992, 91(1): 533-549.
- [47] 商德江. 水声全息场的任意变换方法及源定位问题[D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶学院硕士论文, 1994. 34-45.
- [48] Schenck H A. Improved integral formulation for acoustic radiation problems[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1968, 43: 44-51.
- [49] Burton A J Miller G F. the applicagon of integral equation methods to the numerical solutions of some exterior boundary value problems[J]. Proc Roy Londa, 1971: 323-332.
- [50] Wu T W, Seybert A F. A weighted residual formulation for the CHIEF method in acoustics[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1991, 90(3): 395-402.
- [51] 王有成. 工程中的边界元方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. 42-46.
- [52] 张胜勇, 陈心昭. 体积元边界点法及其在声辐射计算中的应用[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4): 395-400.
- [53] 王秀峰, 陈心昭. 利用边界点法计算结构振动声辐射的近边界声场[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(5): 607-610.
- [54] Zhao Xi Wang, Wu M R. Helmholtz equation least squares method for reconstructing the acoustic pressure filed[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1997, 102(4): 2020-2032.
- [55] Wu S F, Jing you Yu. Reconstructing interior acoustic pressure fields via Helmholtz equation least-squares method[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1998, 104(4): 2054-2060.
- [56] 佐藤知正. ホログラフイックソナー撮像方式[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1983, 49(3): 401-409.
- [57] 中野光雄, ほか 3 名. 音聲二重ホログラフイ法にする音源探査に関する研究[A]. 日本機械學會論文集(C編). 1993, 59(7): 2107-2111.
- [58] Nitadirtk. An experimental undetrwater acoustic imaging system using multi-beam seanning[J]. Acoustical Imaging, 1978, 8: 249-266.
- [59] 张德俊等. 64×64 声全息方阵系统性能评价及水下近距离实验验证[R]. 第三届全国声学会议报告, 1982.
- [60] Jerry L S. A turiaic on underwater acoustic imaging[J]. Acoustical Imaging, 1979; 9: 599-630.
- [61] 何祚镛. 声学逆问题—声全息变换技术及源特性判别[J]. 物理学进展, 1996, 16(3-4): 600-612.
- [62] 程建政等. 编馨振动特性的声全息研究[J]. 声学学报, 2000, 25(1): 87-92.
- [63] 张谷香. 声场的空间变换[D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶学院硕士论文, 1990, 57-62.
- [64] Metherell A F, Spinak S. Acoustical holography of none xistant wavefronts detected at a single point in space[J]. Appl Phys Lett. , 1968, 13: 22-28.
- [65] 竹田博, 音郷ホログラフイに関する研究(半球面ホログラムを用いる音郷ホログラフイの基礎理論)[A]. 日本機械學會論文集(C編), 1985, 61(8): 1991-1999.
- [66] Hildebr B P, Haines K A. Holography by scanning[J]. J. Opt. Soc. Am, 1969, 59(1): 1-8.
- [67] Cutrona L. J. , Leith E. N, Porcello L. J. , Vivian W. E. On the application of coherent optical processing techniques to synthetic aperture radar[J]. PIEEE, 1996, 54: 1026-1033.
- [68] 韦德 G. 声成像(照相机、显微镜相控阵和全息系统)(中译本)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 57-64.
- [69] 程建政, 张德俊. 提高声全息成像分辨率的有限频谱重建法[J]. 声学学报, 1997, 22(4): 303-308.