

# 近场声全息技术及其应用

陈心昭 毕传兴 等 著



科学出版社

# 近场声全息技术及其应用

陈心昭 毕传兴 等 著

科学出版社

## 内 容 简 介

近场声全息是一种功能强大的噪声源识别、定位及声场可视化新技术。本书概述近场声全息的产生、发展及其理论基础,介绍在近场声全息声场空间变换算法、Patch 近场声全息和声场分离技术等方面的研究成果,并提供若干应用实例。

本书在反映国内外有关近场声全息研究成果的同时,重点介绍作者及其研究团队取得的自主研究成果。

本书可供从事噪声与振动控制的专业人员阅读,也可作为高等院校相关专业教师和研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

近场声全息技术及其应用/陈心昭等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037592-6

I. ①近… II. ①陈… III. ①噪声测量-测量技术 IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 114219 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张 倩 / 封面设计:科地亚盟

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



\*

2013年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:15 3/4 插页:2

字数:306 000

定价:65.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

准确识别噪声源是机电产品噪声控制、低噪声设计和声质量设计的前提。近场声全息是 20 世纪 80 年代发展起来的一种非常有效的噪声源识别、定位及声场可视化技术。它测量声源近场全息面上的复声压或质点振速,通过声场空间变换算法,重建出声源表面声压和法向振速,并可预测整个三维声场中任意点处的声压、质点振速、声强以及声源辐射声功率等声学量。由于这项技术在诸多工程领域中具有广阔的应用前景,一经问世,就引起各国学者和工程界的重视,并在过去 30 年中取得了很大的进展。目前,近场声全息的理论构架已基本建立,工程应用的范围正逐步扩大。然而,理论上的完善,特别是更好地解决工程应用中的问题,仍然十分必要。

声源识别是合肥工业大学噪声振动工程研究所的一个主要研究方向。由陈心昭教授及其博士生组成的研究团队从事近场声全息研究已逾 10 年,在近场声全息声场空间变换算法、误差控制、Patch 近场声全息和声场分离技术等方面取得了多项创新成果。发表的有关论文中有 80 余篇被 SCI 或 EI 收录;已获授权国家发明专利 7 项;获安徽省科技进步一等奖和国家自然科学基金委员会工程与材料科学部优秀项目奖各 1 项。

撰写本书的目的是总结这些研究成果,介绍近场声全息的基础理论知识和国内外的代表性成果,供有关科技工作者参考。全书共 7 章,其内容分为以下四个部分:

第 1 章简要评述近场声全息的产生、发展以及国内外的最新研究进展。

第 2~4 章研究近场声全息声场空间变换算法。其中,第 2 和 4 章分别研究基于空间 Fourier 变换和基于等效源法的近场声全息,介绍在改进这些算法和扩大其应用范围方面作者所做的工作;第 3 章介绍作者提出的基于分布源边界点法的近场声全息,说明其在近场声全息建模和计算方面所具有的优势。

第 5、6 章研究 Patch 近场声全息和声场分离技术,重点介绍作者的研究成果。

第 7 章介绍近场声全息应用相关问题及若干应用实例。

本书的执笔分工为:第 1 章,陈心昭;第 3、6、7 章,毕传兴;第 2 章,徐亮;第 4 章,张永斌;第 5 章,徐亮和张永斌。全书由陈心昭和毕传兴统稿和定稿。书中自主研究成果的主要完成人,除执笔者外,还有于飞、李卫兵等。

在研究过程中,作者先后得到多项国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金以及霍英东基金、教育部“新世纪优秀人才支持计划”等的支持,在此表示衷心的感谢。同时感谢合肥工业大学噪声振动工程研究所的陈剑所长及同事,他们对于作者的研究一直给予大力支持。

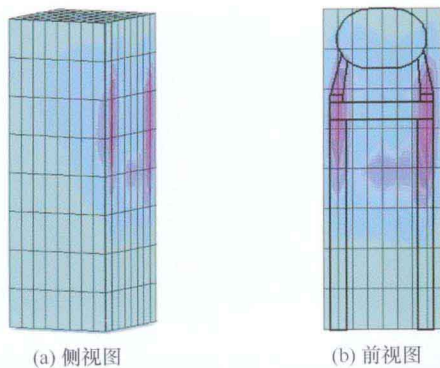


图 7.2.49 385.7Hz 的噪声重建声源表面法向振速幅值分布

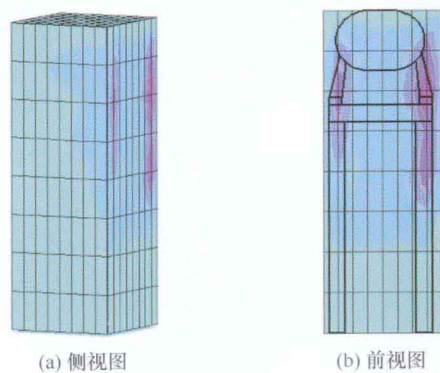


图 7.2.50 576.2Hz 的噪声重建声源表面法向振速幅值分布

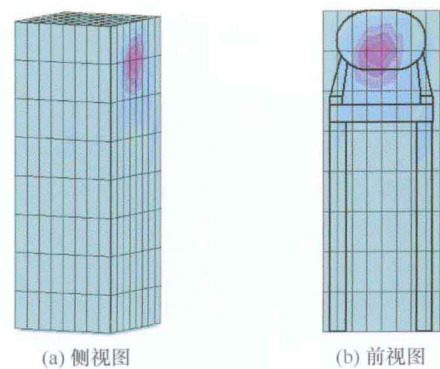


图 7.2.51 从 1533.2Hz 到 1699.2Hz 的宽带平均噪声重建声源表面法向振速幅值分布

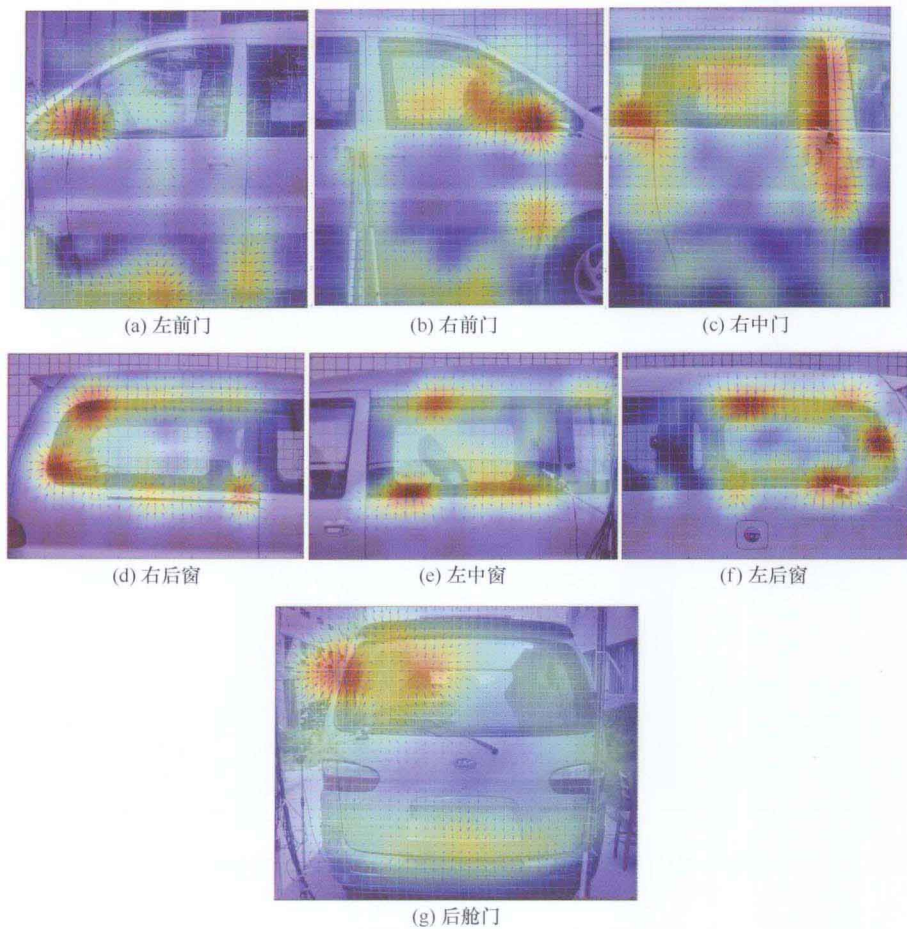
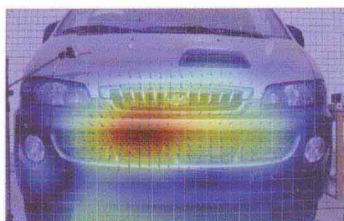


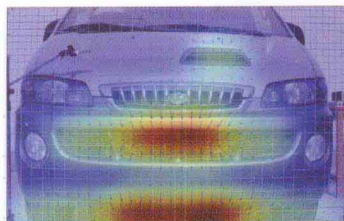
图 7.2.53 重建获得车门和车窗在整个分析频段上有功声强分布



图 7.2.54 重建获得后舱门在 1500~3000Hz 分析频段上有功声强分布

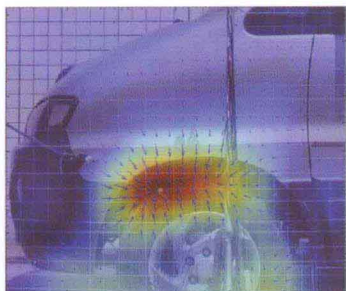


(a) 150~1000Hz

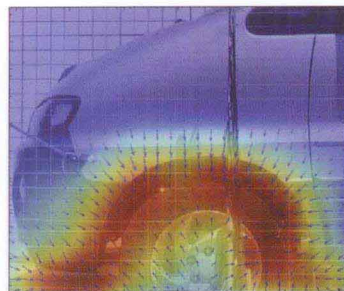


(b) 1000~6000Hz

图 7.2.56 重建获得车前围在不同分析频段上的有功声强分布

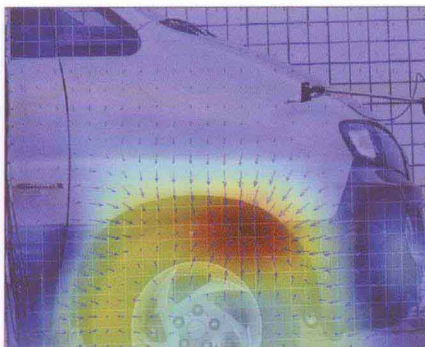


(a) 150~1000Hz

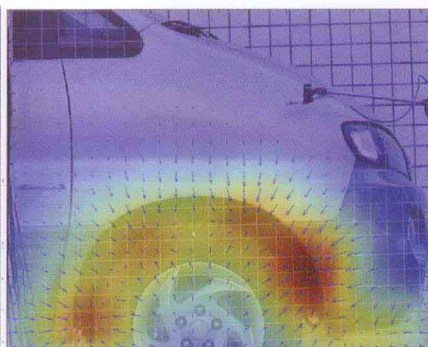


(b) 1000~6000Hz

图 7.2.57 重建获得左前轮在不同分析频段上的有功声强分布



(a) 150~1000Hz



(b) 1000~6000Hz

图 7.2.58 重建获得右前轮在不同分析频段上的有功声强分布

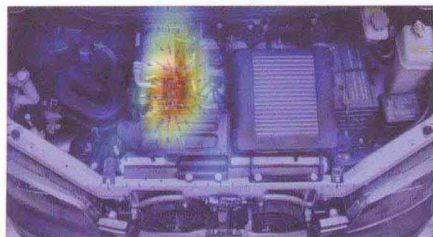


图 7.2.61 重建获得发动机舱内  
460Hz 时的有功声强分布

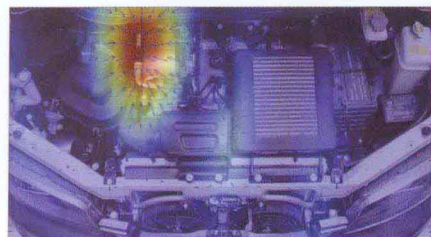


图 7.2.62 重建获得发动机舱内  
677Hz 时的有功声强分布

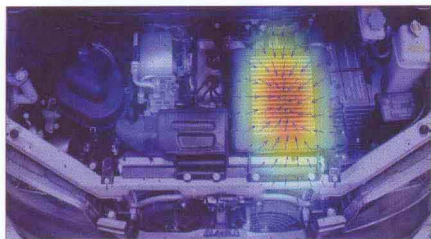


图 7.2.63 重建获得发动机舱内  
1064Hz 时的有功声强分布

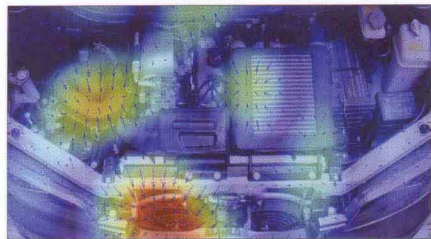


图 7.2.64 重建获得发动机舱内  
86~101Hz 时的有功声强分布

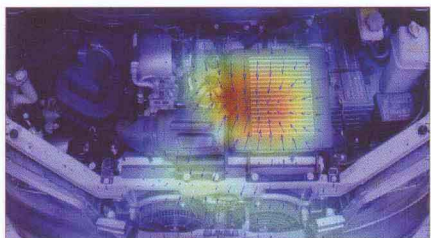


图 7.2.65 重建获得发动机舱内  
101~116Hz 时的有功声强分布

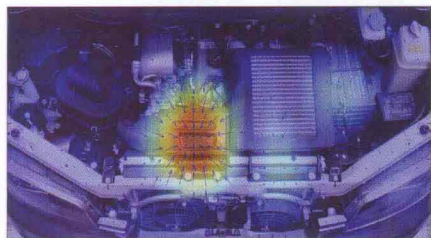


图 7.2.66 重建获得发动机舱内  
116~218Hz 时的有功声强分布

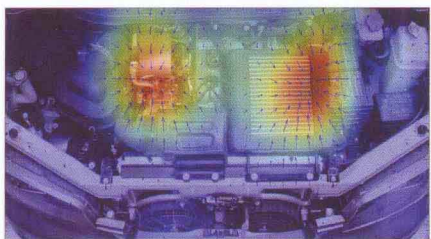


图 7.2.67 重建获得发动机舱内  
218~731Hz 时的有功声强分布

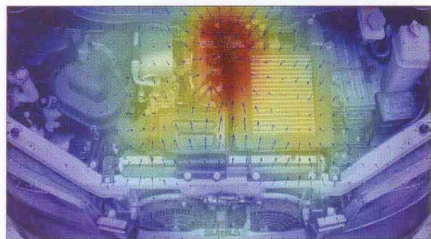


图 7.2.68 重建获得发动机舱内  
731~1170Hz 时的有功声强分布

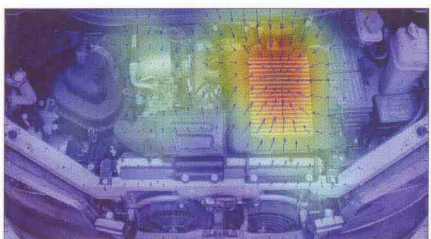


图 7.2.69 重建获得发动机舱内  
1170~1463Hz 时的有功声强分布

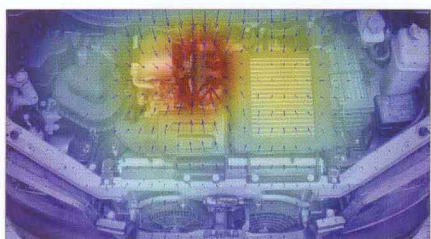


图 7.2.70 重建获得发动机舱内  
1463~6000Hz 时的有功声强分布



# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 近场声全息的产生	1
1.1.1 全息技术	1
1.1.2 声全息技术	3
1.2 近场声全息的发展	6
1.2.1 近场声全息声场空间变换算法	6
1.2.2 近场声全息的测量方法及测量分析系统	9
1.3 近场声全息的最新进展	11
1.3.1 Patch 近场声全息	11
1.3.2 声场分离技术	11
1.3.3 基于质点振速测量的近场声全息	12
参考文献	13
第 2 章 基于空间 Fourier 变换的近场声全息	18
2.1 平面近场声全息	18
2.1.1 平面声辐射理论	18
2.1.2 平面近场声全息算法与实现	26
2.1.3 平面近场声全息重建误差分析	30
2.1.4 波数域滤波	33
2.2 柱面近场声全息	39
2.2.1 柱面坐标系下的 Helmholtz 方程及其解	39
2.2.2 柱面波谱	41
2.2.3 柱面近场声全息算法与实现	44
2.2.4 柱面近场声全息重建误差敏感性分析	47
2.2.5 柱面波谱滤波	48
2.3 球面近场声全息	50
2.3.1 球面坐标系下的 Helmholtz 方程及其解	50
2.3.2 球面近场声全息算法与实现	53
2.3.3 球面近场声全息重建误差敏感性分析	55
2.3.4 球面波谱滤波	57
参考文献	57

<b>第 3 章 基于分布源边界点法的近场声全息</b> .....	59
3.1 分布源边界点法的基本理论 .....	59
3.1.1 声辐射定解问题的描述 .....	59
3.1.2 声辐射定解问题的求解 .....	60
3.1.3 声辐射计算的边界元法 .....	66
3.1.4 声辐射计算的分布源边界点法 .....	70
3.2 基于分布源边界点法的近场声全息原理 .....	74
3.2.1 问题的描述 .....	74
3.2.2 近场声全息重建与预测 .....	75
3.2.3 重建误差的敏感性分析 .....	76
3.2.4 重建过程的正则化处理 .....	77
3.2.5 正则化系数的选取 .....	82
3.3 基于正交球面波源边界点法的近场声全息 .....	85
3.3.1 正交球面波源基本概念 .....	85
3.3.2 基于球面波源叠加法的近场声全息原理 .....	88
3.3.3 正交球面波源边界点法 .....	91
3.3.4 基于正交球面波源边界点法的近场声全息原理 .....	92
3.3.5 两种声全息方法的对比 .....	93
3.4 基于分布源边界点法的半自由场重建方法 .....	94
3.4.1 半自由声场重建问题描述 .....	95
3.4.2 组合传递矩阵的建立 .....	95
3.4.3 组合传递矩阵的特解构造 .....	96
3.4.4 半自由声场重建与预测 .....	97
3.5 基于分布源边界点法的多源场重建方法 .....	98
3.5.1 多源混合声场的声辐射模型 .....	98
3.5.2 单面测量组合法 .....	99
3.5.3 多面测量组合法 .....	100
3.5.4 多面测量消元法 .....	101
参考文献 .....	102
<b>第 4 章 基于等效源法的近场声全息</b> .....	105
4.1 声辐射计算的等效源法 .....	105
4.1.1 等效源积分方程 .....	105
4.1.2 等效源法 .....	107
4.1.3 等效源法和 Kirchhoff-Helmholtz 积分方程的等效性 .....	108
4.1.4 等效源积分方程的离散化和等效源法的数值计算过程 .....	109
4.1.5 等效源法数值计算误差和影响参数分析 .....	111

4.2 基于等效源法的近场声全息原理 .....	117
4.2.1 基于等效源法的近场声全息重建公式 .....	117
4.2.2 基于等效源法的近场声全息的空间变换解释 .....	118
4.2.3 声全息中等效源位置的选择 .....	124
4.2.4 正则化的应用 .....	127
4.3 基于混合层势等效源法的近场声全息 .....	128
4.3.1 单层势表达式 .....	128
4.3.2 等效源法的非唯一性 .....	130
4.3.3 混合层势等效源法 .....	131
4.3.4 基于混合层势等效源法的近场声全息重建公式 .....	133
4.4 基于质点振速测量和等效源法的近场声全息 .....	133
4.4.1 基于质点振速测量和等效源法的近场声全息重建公式 .....	134
4.4.2 基于质点振速测量和声压测量时的重建稳定性对比 .....	134
参考文献 .....	135
<b>第5章 Patch 近场声全息 .....</b>	<b>136</b>
5.1 近场声全息实际应用中存在的困难及其解决方法 .....	136
5.2 Patch 近场声全息的原理 .....	137
5.3 基于带限外推算法的 Patch 近场声全息及其衍生算法 .....	139
5.3.1 全息面数据的波数域带限特性 .....	139
5.3.2 基于 PGa 的 Patch 近场声全息 .....	141
5.3.3 基于快速 Fourier 变换的 Patch 近场声全息 .....	145
5.3.4 基于加权范数外推算法的 Patch 近场声全息 .....	147
5.4 基于等效源法的 Patch 近场声全息 .....	150
5.4.1 采用简单源作为等效源实现全息面数据外推 .....	150
5.4.2 采用正交球面波源作为等效源实现全息面数据外推 .....	151
5.5 统计最优近场声全息 .....	152
5.5.1 基于声压测量的平面统计最优近场声全息 .....	152
5.5.2 基于质点振速测量的平面统计最优近场声全息 .....	162
5.5.3 基于声压测量的柱面统计最优近场声全息 .....	165
5.6 近场声全息的空间分辨率增强方法及其实现过程 .....	168
5.6.1 通过全息面声压插值提高近场声全息的空间分辨率 .....	168
5.6.2 基于 PGa 插值的近场声全息空间分辨率增强方法 .....	169
5.6.3 基于等效源的近场声全息空间分辨率增强方法 .....	169
参考文献 .....	169

<b>第 6 章 声场分离技术</b> .....	172
6.1 声场分离技术的应用背景 .....	172
6.2 基于空间 Fourier 变换的声场分离技术 .....	172
6.2.1 平面声场分离技术 .....	173
6.2.2 柱面声场分离技术 .....	178
6.2.3 球面声场分离技术 .....	182
6.3 基于等效源法的声场分离技术 .....	186
6.3.1 基于声压测量的双面声场分离公式 .....	187
6.3.2 基于质点振速测量的双面声场分离公式 .....	189
6.3.3 基于声压和质点振速测量的单面声场分离公式 .....	190
6.3.4 声场分离过程中误差处理 .....	192
参考文献 .....	192
<b>第 7 章 近场声全息的应用</b> .....	194
7.1 近场声全息测量 .....	194
7.1.1 测量方法 .....	194
7.1.2 近场声全息的测量流程、测量仪器和测量装置 .....	200
7.2 近场声全息的应用实例 .....	204
7.2.1 半自由场中声源识别与声场重建 .....	204
7.2.2 多源声场中声源识别与声场重建 .....	208
7.2.3 非自由场中声场分离与重建 .....	213
7.2.4 Patch 近场声全息重建与分辨率增强 .....	215
7.2.5 某罗茨真空泵的噪声源识别 .....	220
7.2.6 某型汽车的噪声源识别 .....	226
参考文献 .....	233
<b>附录 A 近场声全息涉及的特殊函数</b> .....	235

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 近场声全息的产生

准确识别噪声源是机电产品噪声控制、低噪声设计和声质量设计的前提。早期识别噪声源的方法,如近场声压法和表面振速法,采用声级计和加速度传感器等进行简单的噪声振动测量并加以判断,精度不高。随着电子技术、计算机技术和信号处理技术的迅速发展,频谱分析、相关分析、相干分析等技术不断应用于噪声源识别,此后又出现了声强测量、小波分析、声全息、声聚焦、波束成形等识别噪声源的新技术。近场声全息(nearfield acoustic holography, NAH)正是近年发展起来的一种非常有效的噪声源识别、定位及声场可视化技术,可以为工程设计人员提供丰富的噪声源和声场信息,为机电产品的噪声控制、低噪声设计和声质量设计提供依据。该技术在汽车、航空、机械、潜艇、船舶、兵器、铁道、电子等诸多领域具有广阔的应用前景,因而已成为各国学者研究的一个热点。

### 1.1.1 全息技术

全息技术是利用干涉和衍射原理记录并再现物体真实三维图像的技术。它应用干涉原理记录全息图,然后应用衍射原理重建和显示图像。全息技术的原理是1948年 Gabor 在研究解决电子显微镜球面像差问题时提出的<sup>[1]</sup>,他因此获得1971年度诺贝尔物理学奖。但他当时并未取得理想的实际效果,其原因:一是由于缺乏纯净的干涉光源,全息图像的质量很差;二是重建时产生“孪生像”,多余的像难以分离。1960年激光器问世,为全息技术提供了高相干度的光源;1962年 Leith 等<sup>[2]</sup>应用通信理论,提出了离轴全息方法,此方法让两束相干波的平均传播方向不共线,从而解决了 Gabor 提出的全息技术中“孪生像”的分离问题。由此,全息技术进入了迅速发展和广泛应用时期。

全息技术最先应用于光学领域,产生了全息照相等先进技术。全息照相的第一步是利用干涉原理记录物光信息(图 1.1.1),将物光束与参考光束叠加产生干涉,把物光上各点的相位和振幅转换成在空间上变化的强度,利用干涉条纹间的反差和间隔将物光的全部信息记录下来,在光敏介质(全息底片)上形成一张全息图;第二步是利用衍射原理再现物光信息,即重建和显示(图 1.1.2)。全息图犹如一个复杂的光栅,在相干激光照射下重现出原来的三维物光波场。

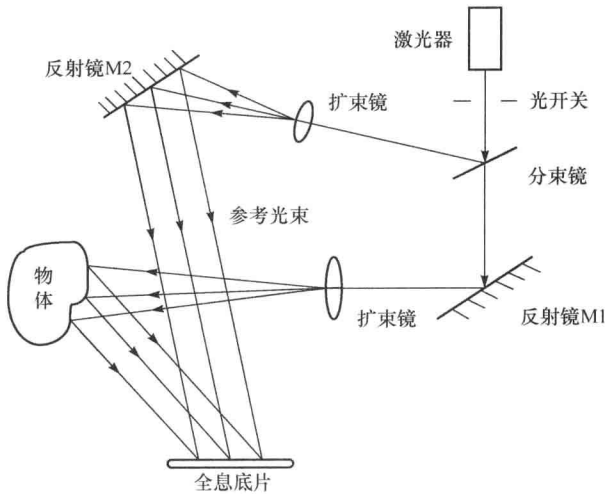


图 1.1.1 物光波前的全息记录

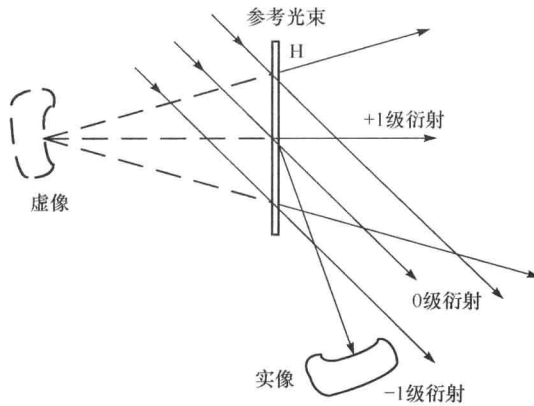


图 1.1.2 物光波前的重现

全息再现的图像具有以下特点:立体感强,具有真实的视觉效果,能提供丰富的信息;全息图的每一部分都记录了物体上各点的光信息,故其每一小片都能再现原物的整个图像;在同一张全息底片上可以记录许多不同的图像,而且能互不干扰地分别显示出来。目前光全息技术已经在立体电影、电视、展览、显微术、干涉度量、投影光刻、军事侦察、水下探测、金属内部探测、保存珍贵的历史文物和艺术品、信息存储和显示、保密防伪等各个方面获得了广泛的应用。

全息理论适用于各种形式波动,因此可以用于任何具有足够相干性的波场,诸如:微波、超声波、电磁波、X射线、红外线、声波、地震波等。声全息技术作为全息技术中的一种,经过四十多年的发展,已经成为一种获得广泛应用的技术。

## 1.1.2 声全息技术

### 1. 从光全息到声全息

声与光一样都具有波动性。与光全息一样,声全息技术也包括全息记录和重建成像两个必不可少的阶段。最初实现声全息,完全借鉴光全息方法:为了得到声全息图,除了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,两者在某一位置产生干涉,形成既有振幅信息又有相位信息的声全息图<sup>[3]</sup>。该参考波一般是超声波,有时也可用电信号来模拟。

声全息图可以记录在液面上,即以液面变形来记录干涉图样,也可记录在照相底片、热塑膜等光敏介质上。重建成像时,用重建光(大多用激光)照射全息图,在衍射光场中获得物体的图像。图 1.1.3 为液面声全息装置示意图。

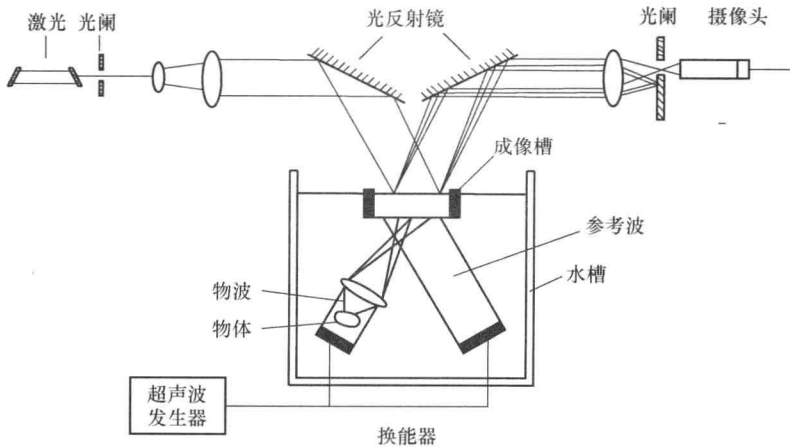


图 1.1.3 液面声全息装置示意图

声全息虽然是在光全息的基础上发展起来的,但是由于声波与光波存在差异,实现声全息的方法与光全息可以不同。在光全息中,由于无法直接测量光波的相位,其相位信息是由物光束与参考光束的干涉获得;而声波的波长远大于光波波长,其振幅与相位可以用传感器直接测量得到。因此,当时出现另一种全息记录方法,即不需要通过干涉,而是用逐点扫描的方法测出各点声波的相位。由于当时技术水平的限制,测量的精度和效率都不高,而且还要把记录的数据用扫描光源进行调制,在光敏介质上记录全息图,然后再用激光照射全息图来获得物像。当时,这种技术主要用来实现物体成像,可用于无损检测、医疗显像、石油探测、水下显像等<sup>[4]</sup>。为了获得高质量的图像,所用的声波波长必须远小于被检测物体尺寸,一般都采用超声波。

## 2. 用于声源识别的远场声全息

声源识别是声全息技术的一个重要应用领域。与物体成像需要提供外来声源不同,在声源识别中需要采集和分析处理的声波大多是由被测对象本身发出的,而且通过介质(如空气)传播的声波频率是比较低的。最早采用声全息技术进行声源识别的研究成果见于 1969 年。Graham 在其题为“Long-wavelength acoustic holography”的博士论文中,提出了用长波长声全息进行声源识别的新方法<sup>[5]</sup>。他用一个传声器在平面上扫描记录声源的辐射声压,将之与同步记录的参考信号一起合成转化得到光学全息图,保存在照相底片上,随后在光学系统上用激光照射重建出声源的辐射声场。两年后,Watson 又在此基础上做了进一步研究,他所用的扫描器上安装有 4 个传声器<sup>[6]</sup>。早期的基于声全息的声源识别技术仍需要辅助光学系统,设备装置十分复杂。对于声源识别分析来说,提供的信息量非常有限,从全息图像中得不到足够的声源位置和传播路径的信息,难以分辨相互靠得很近的声源。这样的声全息技术显然不能有效用来进行声源识别和分析。

早在 1967 年 12 月的第一届国际声全息学术会议上,Goodman 等就提出了数字声全息的概念<sup>[7]</sup>,即:物像除了采用光学方法间接重建外,还可以应用当时问世才两年的快速 Fourier 变换(FFT),在计算机上对记录的数据进行运算,重建物像并打印或显示。尽管当时的计算机技术尚处初创阶段,重建的精度、速度和经济性都不甚理想,连全息技术的创始人 Gabor 对此都不能接受,但 Goodman 等工作无疑为声全息技术的发展开辟了新的道路。

20 世纪 70 年代中,由于以下两个因素,声全息技术进入了数字声全息时代:一是建立在计算机技术、电子技术和数字信号处理技术基础上的现代动态测试技术,使快速准确地直接测量声波的振幅和相位变得容易;二是充分应用声辐射理论和先进的数学工具,并与计算机技术和数字信号处理技术相结合,发展了多种声场空间变换方法,直接在计算机上进行重建和显示。由此,声全息技术迅速发展成为一种非常有效的噪声源识别、定位及声场可视化技术。

1974 年,Ueha 等应用声全息技术识别齿轮噪声源,如图 1.1.4 所示<sup>[8]</sup>。传声器 M2 用步进电机驱动在一平面上逐点扫描测量,固定传声器 M1 则提供参考信号。在此平面上测得齿轮声辐射的复声压数据输入计算机进行运算并显示声场的重建结果。由于在此测量平面上能获得声辐射的振幅和相位信息,并以此进行声场重建,其作用与全息照相中的全息底片相当,因此称此测量面为全息面。在该试验中,全息面与齿轮的距离  $Z_0 = 104\text{cm}$ 。

2000 年前后,国内有的高校开展了应用远场声全息进行噪声源识别的研究。清华大学杨殿阁等以汽车为研究对象,应用此技术识别汽车的噪声源,他们还利用声全息方法分析在运动状态下汽车的噪声辐射<sup>[9]</sup>。



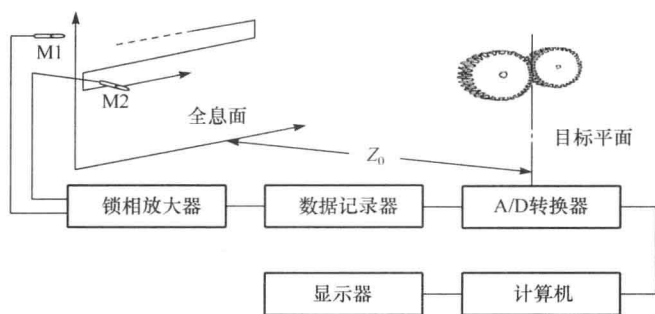


图 1.1.4 用声全息技术识别齿轮噪声源

在应用远场声全息进行声源识别的过程中发现,重建图像的空间分辨率不高,即受到瑞利判据的限制,重建分辨率不超过分析波长的  $1/2$ 。这对于频率很高、波长很短的声波,问题还不小,但用来进行机电设备的噪声源识别,其分析频率范围一般在几十到数千赫兹之间,就不可接受了。例如,对于频率为  $100\text{Hz}$  的噪声源,其重建分辨率为  $1.7\text{m}$ ,就无法进行有效的噪声源识别和定位。

### 3. 用于声源识别的近场声全息

随着声全息理论研究的不断深入,人们发现早期声全息的瑞利分辨率限制,并非是声全息技术固有的缺陷,而是因为记录全息数据时测量面的位置不当所致。声源辐射的声波在空间频率域(波数域)可划分为低空间频率(波数  $k \leq 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长)的传播波(propagating wave)和高空间频率(波数  $k \geq 2\pi/\lambda$ )的倏逝波(evanescent wave)。传播波对应声场中的宏观信息,而倏逝波则对应声场中的细节信息。倏逝波的幅值随距离呈指数衰减,通常在一个波长的距离内已衰减殆尽。一般全息数据多在声源的辐射或散射声场的菲涅耳区以外记录,即全息面与源面之间的距离  $d \gg \lambda$ 。在此条件下传感器只能接收传播波成分,丢失了携带目标声源细节信息的倏逝波成分。它能够测量到的最高波数就是传播波的波数上限  $2\pi/\lambda$ ,声全息重建的空间分辨率为波长之半,即  $\lambda/2$ 。然而,只要在距离声源很近的近场区域内记录全息数据,正确记录到足够多的倏逝波成分,就能突破成像精度的瑞利分辨率限制。基于以上分析,Williams 等在 1980 年建立了近场声全息理论<sup>[10]</sup>。近场声全息要求在被测对象的近场( $d \ll \lambda$ )记录全息数据,由于它包含了随距离增加其幅值呈指数衰减的倏逝波成分信息,从而可以获得分辨率不受分析波长限制的重建图像以及丰富的声场信息。

用近场声全息进行声源识别分析时,以振动体声辐射的结果量作为输入量,即以靠近声源的全息面上的部分声学量(复声压或质点振速)作为输入量,借助声场空间变换算法,重建出声源表面声压和法向振速,并可预测整个三维声场中任意点