

多源相干/不相干声场的 分离与重建

景文倩 聂金泉 吴华伟 著



南京大学出版社

多源相干/不相干声场的 分离与重建

景文倩 聂金泉 吴华伟 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

多源相干/不相干声场的分离与重建方法研究 / 景文倩, 聂金泉, 吴华伟著. — 南京: 南京大学出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-305-20377-0

I. ①多… II. ①景… ②聂… ③吴… III. ①相干场—声场—研究 ②非相干—声场—研究 IV. ①O422.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 135437 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 多源相干/不相干声场的分离与重建方法研究

著 者 景文倩 聂金泉 吴华伟

责任编辑 刘 灿 编辑热线 025-83597482

照 排 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 11.75 字数 204 千

版 次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-20377-0

定 价 45.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

作 者 简 介

景文倩,女,1987年出生,工学博士,湖北文理学院汽车与交通工程学院讲师,主要研究方向为:非自由声场中噪声源识别及声场可视化和汽车 NVH 测试分析。学习工作经历:2006—2010 年就读于合肥工业大学过程装备与控制工程专业,于 2010 年获得工学学士学位,并获得推荐免试研究生资格;2011—2016 年就读于合肥工业大学机械电子工程专业,于 2016 年获得工学博士学位,攻读博士学位期间,于 2014 年前往荷兰 Microflown Technologies 公司实习交流 6 个月,与公司建立了良好的持续合作关系。自 2010 年以来,参加多项国家自然科学基金项目的相关研究工作,同时也参与了多项校企合作研究项目;目前正主持 1 项国家自然科学基金青年基金项目 and 1 项校企合作研究项目。发表学术论文 7 篇,其中 SCI 检索 4 篇,EI 检索 7 篇。荣获“湖北文理学院新进教师基本功大赛”二等奖 1 项、优胜奖 1 项、“湖北文理学院立德树人教职工演讲比赛”三等奖 1 项。

聂金泉,男,1987 年出生,工学博士,湖北文理学院汽车与交通工程学院讲师。主要研究方向为机电系统建模与仿真、测试与控制技术。参与多项国家自然科学基金项目、湖北省技术创新专项重大项目,承担湖北省技术创新专项重点项目 1 项,校企合作研究项目 2 项;发表学术论文 4 篇,其中 SCI、EI 检索 3 篇;授权软件著作权 2 项;获得湖北省科技进步三等奖 1 项。

吴华伟,男,1979年出生,工学博士,湖北文理学院汽车与交通工程学院副教授。长期致力于汽车、航空等交通领域的机电控制系统设计、仿真、优化及故障诊断及健康管理等方面的教学科研工作。先后承担、参与了多项新能源汽车控制器、军民用飞机制动系统、863计划项目、省部级项目、国防军工项目等科研工作,与企业签订10余个技术开发合同,科技成果鉴定达“国内领先”水平4项,科技成果转化3项;发表学术论文20余篇,其中EI检索7篇,核心期刊10余篇,出版学术专著1部,教材1部;授权计算机著作权19项,实用新型专利15项,发明专利3项。获湖北省第四批“博士服务团”工作先进个人,空军装备理论研究优秀成果奖1项,第六届襄阳市青年科技奖,湖北省科技进步奖1项。

近场声全息技术(NAH)是一种先进的噪声源识别定位和声场可视化技术,通过在靠近声源的近场区域测量声场,可以重建获得声源表面以及整个三维声场的声学信息,从而为机电产品的低噪声设计、声质量设计以及噪声控制提供可靠依据。但是 NAH 技术要求测量必须在自由声场环境下进行,而实际的声场环境比较复杂,一般都是非自由声场环境。

本书以几个比较典型的非自由声场为研究对象,介绍多源相干/不相干声场的分离与重建。全书共分为五章,主要包括:

第一章从多个方面回顾了 NAH 技术的发展历程和研究现状,并重点介绍了多源相干/不相干声场中 NAH 技术的发展和研究现状。

第二章研究噪声源接近地面的声场环境,即半空间声场,介绍在提高半空间声场重建精度以及摆脱对反射面阻抗特性的依赖性方面所做的工作。

第三章研究噪声源处于封闭空间内的声场,介绍声场分离技术和 patch NAH 在封闭空间声场中消除干扰源或反射声,实现目标声源局部重建的能力,并分析声场分离和重建过程中的误差敏感性。

第四章研究非完全相干声场,介绍提高部分场分解精度的基于质点振速参考的部分场分解方法,并研究质点振速参考的位置和方向对部分场分解精度的影响。另外,研究一维和三维声强探头的灵敏度测量方法,介绍一种基于 NAH 的质点振速传感器灵敏度测量方法。

第五章研究既适用于相干声场,也适用于非完全相干声场的宽带声全息(BAHIM)技术,介绍三维声强探头在无参考情况下完成全息面上复声压和法向质点振速的测量,实现全息面两侧声场的分离和目标声源的重建。另外,介绍多种解决该技术中奇异性问题的方法。

第六章对本书的研究工作进行总结和概括,并对进一步的工作进行展望。

本书紧跟国内外有关近场声全息的研究热点,重点介绍作者在多源相干/不相干声场分离与重建方法研究过程中的自主研究成果。本书可供从事噪声与振动测试、分析及控制的研究生、学者和工程技术人员参考和阅读。

本书的出版得到国家自然科学基金项目(11704110)、“机电汽车”湖北省优势特色学科群和纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室开放基金项目、襄阳市研究与开发计划项目(20141216)的资助,在此表示衷心感谢!

限于作者学识水平有限,书中必然存在疏漏和不妥之处,衷心希望本书读者提出宝贵意见,来信请联系 jwqtkhz@126.com。

作者
2018年4月

第 1 章 绪论	1
1.1 NAH 技术的产生、发展及研究现状	3
1.1.1 全息数据的测量方法	5
1.1.2 全息变换算法	8
1.1.3 Patch NAH 技术	11
1.1.4 基于质点振速测量的 NAH 技术	13
1.2 多源相干/不相干声场中 NAH 技术的发展和研究	17
1.2.1 声场分离技术	17
1.2.2 多源相干声场重建方法	21
1.2.3 半空间声场重建方法	22
1.2.4 部分场分解方法	23
1.3 主要内容	24
1.4 本章小结	26
第 2 章 基于等效源法的半空间声场重建	27
2.1 理论基础	28
2.1.1 基于 ESM 的半空间声辐射计算	28
2.1.2 基于 D-ESM 的半空间 NAH 技术	30
2.1.3 基于 I-ESM 的半空间 NAH 技术	31
2.2 数值仿真	33
2.2.1 半空间声辐射计算	34
2.2.2 半空间声全息计算	38
2.2.2.1 振动球表面法向振速重建	38
2.2.2.2 CRP 等效源配置分析	41
2.3 实验研究	44
2.3.1 大理石地板反射面	44

2.3.2 海绵吸声材料反射面	48
2.4 本章小结	51
第3章 基于双面 patch NAH 技术的声场分离与重建	52
3.1 基于 ESM 的单面 patch NAH 技术	52
3.2 基于 ESM 的双面 patch NAH 技术	53
3.2.1 基本理论	54
3.2.2 误差敏感性分析	55
3.3 数值仿真	57
3.4 实验研究	64
3.4.1 两个音箱实验	64
3.4.2 某汽车内实验	68
3.5 本章小结	72
第4章 基于质点振速参考的部分场分解与声场重建	73
4.1 $p-u$ 声强探头的结构和工作原理	74
4.2 $p-u$ 声强探头灵敏度的测量	75
4.2.1 基础理论	75
4.2.1.1 基于 ESM 的 NAH 技术	75
4.2.1.2 基于 NAH 的灵敏度测量方法	76
4.2.2 实验研究	77
4.2.2.1 一维 $p-u$ 声强探头	78
4.2.2.2 三维 $p-u$ 声强探头	82
4.3 基于质点振速参考的部分场分解与声场重建	87
4.3.1 理论基础	87
4.3.1.1 基于虚相干法的部分场分解方法	88
4.3.1.2 基于偏相干法的部分场分解方法	89
4.3.2 数值仿真	90
4.3.2.1 有效性验证	90
4.3.2.2 部分场分解精度影响因素分析	101
4.3.3 实验研究	115
4.4 本章小结	122

第 5 章 基于三维声强探头和宽带声全息的声场分离与重建	123
5.1 理论基础	123
5.1.1 复声压和法向振速的恢复	124
5.1.2 基于恢复复声压和法向振速的声场分离技术	126
5.1.3 目标声场的重建	128
5.1.4 奇异性问题	128
5.2 数值仿真	132
5.2.1 单极子声源	133
5.2.1.1 复声压相位的恢复精度分析	133
5.2.1.2 有干扰声源作用时 3D-BAHIM 技术的有效性验证	135
5.2.2 板声源	140
5.2.2.1 复声压相位的恢复精度分析	140
5.2.2.2 有干扰声源作用时 3D-BAHIM 技术的有效性验证	142
5.3 实验研究	145
5.4 本章小结	149
第 6 章 总结与展望	151
6.1 基于 ESM 的半空间声场重建	153
6.2 基于双面 patch NAH 技术的声场分离与重建	154
6.3 基于质点振速参考的部分场分解与声场重建	154
6.4 基于三维声强探头和宽带声全息的声场分离与重建	155
6.5 有待进一步解决的问题	156
参考文献	160

第 1 章 绪 论

随着我国国际影响力的大幅提升,我国机电产品逐渐走向世界,但是产品的噪声振动问题一直制约着我国国际竞争力。因此,尽快在噪声测试分析及研究设备上达到更高水平,推动我国机电行业发展和提高机电产品的国际竞争力具有重要意义。

近场声全息(NAH)技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种先进的噪声测试分析技术,其工作原理如图 1.1 所示。该技术在靠近声源的近场区域测量获取全息数据,故可获得大量倏逝波成分,进而突破瑞利分辨率判据的限制,使得其空间分辨率达到分析波长的十几分之一。另外,该技术仅需测量全息面上的声压或质点振速,既可重建声源表面的声压和法向振速,还可重建和预测三维空间声场中任意点处的声压、质点振速、声强、声功率以及远场指向性等。正因为这些独特优势,该技术可为产品的低噪声设计、声质量设计以及噪声控制等提供可靠依据,如图 1.2 和图 1.3 所示。现已被广泛用于飞机、船舶、汽车和家电等机电行业,并逐渐发展成为解决这些机电产品噪声问题的强有力工具。

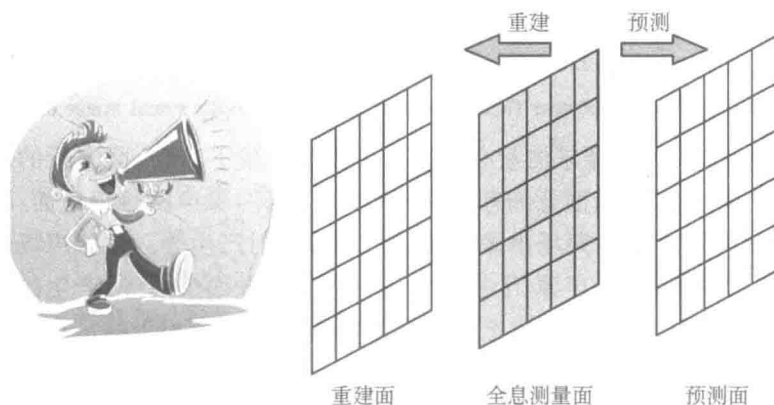


图 1.1 近场声全息技术原理图

Fig 1.1 Schematic diagram of near field acoustical holography technology

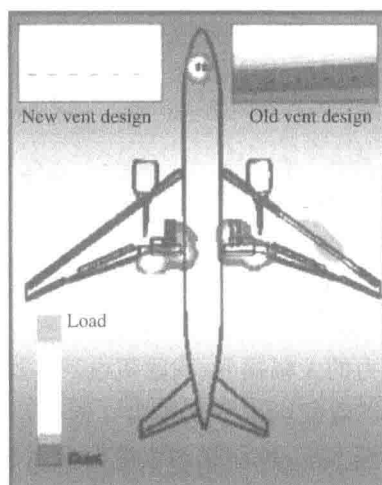


图 1.2 近场声全息技术在飞机噪声设计中的应用

Fig 1.2 Application of near field acoustical holography to the noise design of plane

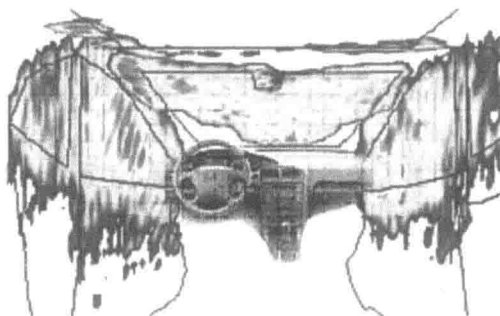


图 1.3 近场声全息技术应用于汽车声成像

Fig 1.3 Application of near field acoustical holography to the sound image of vehicle

但是 NAH 技术要求测量必须在自由声场环境下进行,而实际的声场环境比较复杂,比如测量面背侧有干扰声源或反射体,噪声源接近地面,噪声源处于封闭空间内,或者声场由多个不相干声源辐射产生等。这些声场可以看成是由多个声源(目标声源、干扰声源、地面反射、壁面反射等)产生的声场的叠加,这些声源之间可能是完全相干的也可能不是完全相干的。在这些实际环境中,实现目标声源重建的前提是消除目标声源以外其他所有声源的影响。因此,研究多源相干/不相干声场的分离与重建方法具有重要的实际意义和工程价值。

本章首先介绍 NAH 技术的产生、发展及研究现状,然后重点介绍多源相干/不相干声场中 NAH 技术的发展和研究现状,最后给出本书的主要研究内容。

1.1 NAH 技术的产生、发展及研究现状

20 世纪 40 年代末,著名物理学家,诺贝尔奖获得者 Dennis Gabor^[1]在利用光学技巧解决电子显微镜球面像差问题时提出了全息术,该技术可以显示不可见辐射波场,是一种非常直观且有效的波场研究方法。全息技术是一种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,其工作原理可分为两步。第一步是拍摄记录过程,利用干涉原理记录物体光波信息。如图 1.4 所示,被摄物体在激光辐照下形成漫射式的物光束;另一部分激光作为参考光束射到全息底片上,和物光束叠加产生干涉,把物体光波上各点的位相和振幅转换成在空间上变化的强度,从而利用干涉条纹间的反差和间隔将物体

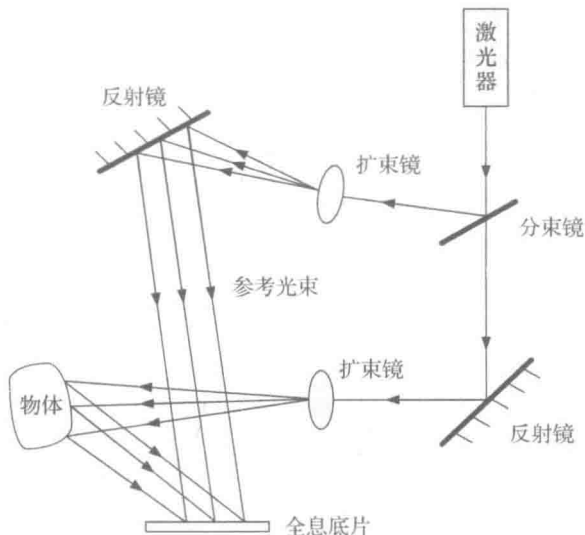


图 1.4 物体光波信息的记录

Fig 1.4 Record of the optical information of one object

光波的全部信息记录下来。第二步是成像过程,利用衍射原理再现物体光波信息。如图 1.5 所示,全息图犹如一个复杂的光栅,在相干激光照射下,重现原来的三维物体光波信息。全息图的每一部分都记录了物体上各点的光信息,故原则上它的每一部分都能再现原物的整个图像,通过多次曝光还可以在同一张底片上记录多个不同的图像,而且能互不干扰地分别显示出来。在 20 世纪 60 年代^[2-5],全息术被推广到声学领域。1967 年,Mathers 和 Hussein 等^[6]提出了声全息的概念。传统声全息技术只记录了携带低空间频率信息的“传播波”(Propagating Wave)成分,而丢失了携带高空间频率信息的“倏逝波”(Evanescent Wave)成分,导致重建图像的空间分辨率受瑞利判据限制,最高只能达到分析波长的二分之一。

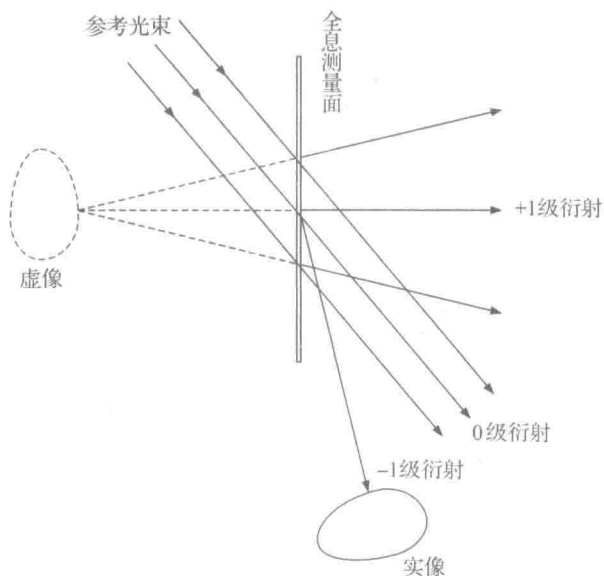


图 1.5 物体光波信息的重现

Fig 1.5 Reappear of the optical information of one object

为了突破瑞利判据的限制,Williams 和 Maynard 等于 20 世纪 80 年代提出了 NAH 技术^[7-11]。该技术在声源的近场记录全息数据,获取了倏逝波成分,使得重建图像的分辨率突破了瑞利判据的限制,可以达到分析波长的十几分之一。此外,该技术只需记录全息数据,既可实现三维空间声场的可视化。因此,NAH 技术适合用于复杂结构的振动和噪声特性研究,在实际工程中具有很大的应用价值和应用前景。

近 30 年来,NAH 测量方法和变换算法都得到了多元化的发展,而且逐步考虑了声源形状和尺寸以及测量环境的多样性,发展出了 patch NAH 技术、基于质点振速测量的 NAH 技术,下面分别介绍这些方法和技术的发展历程和研究现状。

1.1.1 全息数据的测量方法

应用 NAH 技术的前提是准确获取全息面上的声学信息。理论上讲,复声压或质点振速都可以作为全息输入,但由于传感器成本的限制,通常测量全息面上的复声压作为全息输入。复声压的幅值可以根据传声器测量信号的自谱直接得到,但由于各个测点处的相位随时间变化,因此相位的获取相对困难。下面根据全息面上复声压相位的获取形式,介绍四种测量方法:

1. 快照法

所谓快照法,就是同时测量全息孔径内所有测点处的复声压幅值和相位。如图 1.6 所示为采用快照法获取摩托车表面全息数据,该方法要求传声器组成的测量阵列必须完全覆盖全息孔径,并一次性完成所有测点处的测量,其优点在于:不需要参考信号;采集数据精度高、速度快;对相干或不相干声场、稳态或非稳态声场都适用。在 Maynard 和 Williams^[7]首次提出 NAH 技术时,全息面上复声压就是通过快照法获取的。但是,快照法也有明显的缺点:需要大量的传声器,尤其是待测物体较大时,且要求采集测试设备有与传声器相匹

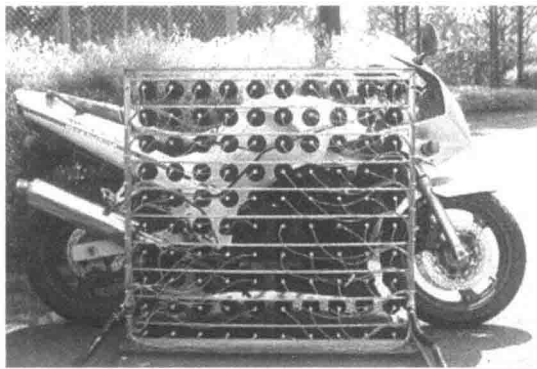


图 1.6 采用快照法获取摩托车表面全息数据

Fig 1.6 Acquiring the holographic data of the motorcycle by using the snapshot method

配的足够多的并行测量通道;另外,传声器的标定工作量也比较大,如图 1.7 和图 1.8 所示。总之,快照法的高额成本严重限制了其在实际工程中的应用。

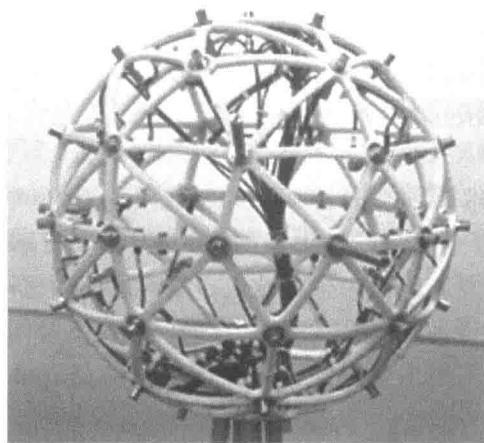


图 1.7 球型阵列

Fig 1.7 Spherical array

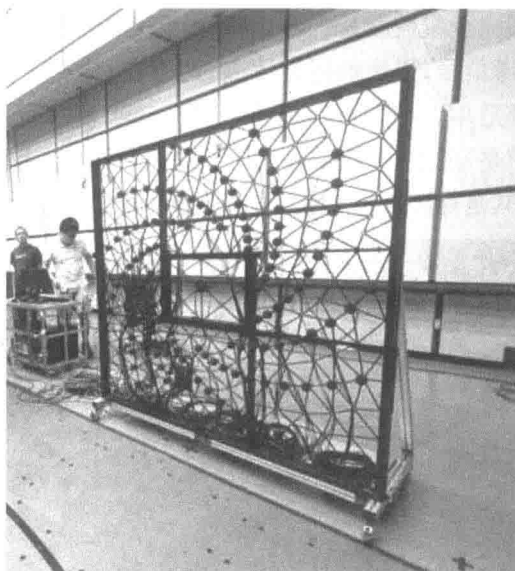


图 1.8 辐射平面阵列

Fig 1.8 Radiation planar array

2. 单参考源传递函数法

单参考源传递函数法需要一个参考信号,该信号可以来自声源的输入信号,也可以在待测声场中选取一个与声源相对位置保持不变的固定参考点。采用小模块阵列或线阵列扫描测量全息面,如图 1.9 所示为小模块扫描阵列,在测量全息面网格点处声压的同时也测量参考点处声压,然后将全息测点处采集的声压信号与同步采集的参考点处声压信号作互谱^[12-16]得到复声压的相位。这种方法比较适用于单频声场和宽频相干声场,不宜用于非完全相干的声场,原因是一个固定的相位函数无法描述非完全相干声场中一个测点处的相位变化关系。



图 1.9 扫描阵列

Fig 1.9 Scanning array

3. 多参考源互谱测量法

B&K 公司的 Hald^[17]首先提出互谱测量法,该方法在潜在声源附近布置多个参考传声器,通过对场点信号与参考信号之间的互谱矩阵做奇异值分解(SVD),并结合主谱能量分析(PCA)技术,将全息面上的非完全相干声场分解成若干个部分场。这些部分场分别对应各个潜在噪声源的声场分量,且每个部分场都完全相干。该方法适用于非完全相干声场,如文献[17-20]使用该测量方法实现了动力系统或汽车等宽带噪声源的 NAH 分析,消除了地面反射的影响。但是,该方法要求参考源的数目不小于潜在噪声源的数目,且各个参考源应尽量靠近各自对应的噪声源,所以该方法需要预知噪声源的数目和位置。