

李卫兵◎著

陈心昭◎导师

基于统计最优和波叠加方法的 近场声全息技术研究

JIYU TONGJI ZUIYOU HE
BODIEJIA FANGFA DE
JINCHANG SHENGQUANXI
JISHU YANJIU

HUBING BOSHI WENCONG

斛兵博士文丛



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

013033145

0422.2

03

基于统计最优和波叠加方法的 近场声全息技术研究

李卫兵 著 陈心昭 导师



合肥工业大学出版社



北航

C1640301

0422.2
03

01030314

图书在版编目(CIP)数据

基于统计最优和波叠加方法的近场声全息技术研究/李卫兵著. —合肥:
合肥工业大学出版社, 2012. 10

(斛兵博士文丛)

ISBN 978 - 7 - 5650 - 0487 - 2

I. ①基… II. ①李… III. ①声场—研究 IV. ①0422. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 231259 号

基于统计最优和波叠加方法的近场声全息技术研究

李卫兵 著 陈心昭 导师 责任编辑 吴毅明

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2012 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2012 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	总 编 室:0551-2903038	印 张	10.25
	市场营销部:0551-2903198	字 数	157 千字
网 址	www. hfutpress. com. cn	印 刷	合肥学苑印务有限公司
E-mail	hfutpress@163. com	发 行	全国新华书店

ISBN 978 - 7 - 5650 - 0487 - 2

定价: 25.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐杻巍

副主任委员：刘光复 赵 韩

委 员：（按姓氏笔画为序）

刘全坤	刘光复	陈心昭
陈翌庆	罗建平	祖方道
赵 韩	徐杻巍	徐科军
梁昌勇		

出版编辑委员会

主任委员：刘心报

委 员：高 隽 陈翌庆 黄 康

李克明 孟宪余

史维芳 权 怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》(教研[2005]1号)文件精神,培养研究生创新意识、创新能力,提高研究生培养质量,合肥工业大学设立了研究生科技创新基金,以支持和资助研究生的教育创新活动,为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新,出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学 2008 届部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量,《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则,充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版,得到了相关兄弟院校和有关专家的大力支持,也得到了研究生导师和研究生的热情支持,我们谨此表示感谢,希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好,但由于我们经验不足和学识水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2011 年 11 月

总 序

胡锦涛总书记指出,为完成“十二五”时期经济社会发展的目标任务,在激烈的国际竞争中赢得发展的主动权,最根本的是靠科学技术,最关键的是大力提高自主创新能力。“提高自主创新能力,建设创新型国家”已明确写进了党的十七大报告。而创新型国家的建设靠人才,人才的培养靠教育。博士生教育与我国科学技术的进步与发展,与社会经济的发展有着直接而密切的联系,是国家创新体系的重要组成部分,研究生尤其是博士研究生培养质量如何,将集中体现一所高校的教育和科研水平。

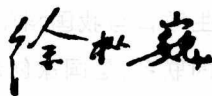
博士论文的研究工作一般都能体现本领域学科发展的前沿性和某些行业多元发展的战略性,应具有一定的创新性。为鼓励广大研究生,特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究,进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力,激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性,展示我校博士研究生的学术水平,学校经过精心筹划,编辑出版了《斛兵博士文丛》。

此次入选《斛兵博士文丛》的论著,均为2008年毕业并获得博士学位的优秀博士研究生学位论文。我校的优秀博士学位论文评选工作旨在逐步建立有效的质量监督和激励机制,培养和激励我校在学博士生的创新精神,构建高层次创造性人才脱颖而出的优良氛围。同时优秀博士学位论文代表着我校博士生培养的最高水平,对我校博士生教育起到了示范作用。这套丛书中的论文大体上都有以下几个显著特点:一是选题均为本学科的前沿,具有较大的挑战性;二是论文的创新性突出,或是在理论上或是在方法上有创新;三是论文的成果较为显著,大多都在国际学术刊物上发表了与该论文有关的学术论文。

《斛兵博士文丛》的出版也是我校实施研究生创新工程的一个重要举措。伴随着办学条件的不断改善、人才培养政策的日趋完善和高层次创新型人才成长的良好环境的不断构建,一定能达到多出人才、快出人才、出好人才的目标。

我衷心希望广大研究生发扬我校的优良传统,在严谨求实、开放和谐、充满生机与活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新,通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文,为进一步提高我校的学术水平作出更大的贡献,为把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学而不懈努力。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



二〇一一年十一月

摘要

近场声全息技术是一种非常有效的噪声源识别、定位及声场可视化技术,它只需在靠近声源的全息面上测量复声压,就可以重建与预测整个三维空间声场中任意点处的声压、质点振速矢量、声强矢量以及声源辐射的声功率等声学量。本文在简要回顾了近场声全息技术的发展历史和研究现状的基础上,针对其中存在的一些亟需解决的问题进行了研究,并提出了解决途径。为了克服基于空间声场变换的近场声全息技术对全息测量孔径面积的严格要求,本文发展了基于统计最优方法的近场声全息技术;针对基于常规波叠加方法的近场声全息技术在相干声场和半自由声场重建与预测过程中的局限性,提出了基于联合波叠加方法的相干声场重建技术和基于波叠加方法的半自由声场全息技术;对点激励固支板辐射声场的实验研究,验证了近场声全息技术在声场重建与可视化过程中的有效性、可行性以及准确性,为近场声全息技术走向实际应用打下了基础。全文九章的研究内容概括如下:

第1章简要回顾了近场声全息技术的发展历史和研究现状,分析了各种近场声全息技术的特点,针对其中存在的一些亟需解决的问题,确立了本文的主要研究内容。

第2章简要介绍了基于空间声场变换的平面近场声全息技术的基本理论。在此基础上运用声场叠加原理,从理论上证明了统计最优平面近场声全息(SOPNAH)技术的全息重建与预测公式;并以 Nyquist 采样定理为基础,提出了一种确定波数矢量的新方法;为了克服常规 SOPNAH 的应用局限性——全息面一侧的声场必须为自由声场,推导了适用于 SOPNAH 的、基于双全息面测量的空间声场分离公式。

第3章提出了一种实现柱面近场声全息的新方法——统计最优柱面近

场声全息(SOCNAH)。针对柱面内、外声辐射问题,分别推导了统计最优柱面内、外近场声全息技术的理论公式。在此基础上,为了解决全息柱面两侧均有声源情况下的柱面声场重建问题,提出了统计最优柱面声场分离技术,并且深入地研究了统计最优柱面近场声全息技术的实施过程和关键参数的选择。

第4章将基于统计最优方法的近场声全息技术扩展到球面坐标系,提出了统计最优球面近场声全息技术,完善了整个基于统计最优方法的全息技术的体系结构。同样针对球面内、外声辐射问题,分别建立了统计最优球面内、外近场声全息技术,发展了球面声场分离技术。

第5章给出了声辐射问题的声学基础和定解问题描述,引入了波叠加方法的基本公式;在此基础上,建立了基于波叠加方法的近场声全息技术的重建与预测公式;详细分析了基于波叠加方法的全息技术的不适定性问题;介绍了几种常用的正则化方法和正则化参数的选择方法;最后进行了实验验证。

第6章针对基于常规波叠加方法的近场声全息技术在相干声场全息重建与预测过程中所存在的局限性,提出了基于联合波叠加方法的相干声场全息重建与预测技术。并且针对不同数量的全息面个数,提出了两种不同的基于联合波叠加方法的相干声场全息重建与预测技术。

第7章针对基于常规波叠加方法的近场声全息技术在半自由声场全息重建与预测过程中的局限性,以波叠加方法作为全息变换算法,在充分考虑反射声压的基础上,建立了反射面为刚性和非刚性条件下的半自由声场全息重建与预测模型,解决了半自由声场环境下的全息重建与预测问题,拓宽了全息技术的应用范围。

第8章介绍了一种声学测量装置的研制过程,该装置能快速、方便、精确地实现各种声学测量过程中的传感器定位和移动问题;运用该装置对点激励固支薄钢板的辐射声场进行了全息研究,进一步验证了近场声全息技术在实际声源辐射声场研究中的可行性。

第9章总结了本文的主要研究成果,指出了需要进一步研究和解决的问题。

关键词: 声全息,统计最优,波叠加,联合波叠加,逆问题

Abstract

Nearfield acoustic holography (NAH) is a powerful tool for identifying noise sources and visualizing acoustic field. By measuring the plural sound pressures on a hologram surface close to the noise sources, the acoustic quantities such as sound pressure, particle velocity and sound intensity at any point in the three-dimensional acoustic field as well as the sound power radiated by sound source can be reconstructed or determined. Firstly, the history of NAH has been reviewed, and the current status and problems to be solved have also been analyzed. In order to overcome the rigid requirement on the measuring size of the hologram surface in the spatial transform of sound field based NAH (STSF based NAH), the statistically optimized method based NAH has been developed. For overcoming the shortcomings of the routine wave superposition approach based NAH (WSA based NAH) in the holographic reconstruction of the coherent acoustic field and the semi-free acoustic field, combined wave superposition approach based NAH and NAH for the semi-free acoustic field have been presented. The dissertation is summarized as follows:

In chapter one, the history of NAH has been reviewed, the current status and problems to be solved have also been analyzed. The advantages and disadvantages of different kinds of implementation algorithms of NAH have been analyzed too. Then the solutions to these problems have been presented and the main research content of this dissertation has been determined.

In chapter two, the sound field superposition theory is used to prove

the formulas of the statistically optimal planar nearfield acoustic holography. A simple and effective method, which is used to choose the wave number vector, is proposed. To overcome the limitation, that sound field on one side of hologram surface must be free, on application of the normal statistically optimal planar nearfield acoustic holography, the sound field separation technique with two hologram surfaces is proposed.

In chapter three, statistically optimal cylindrical interior and exterior nearfield acousticholography have been presented. The acoustic field separation technique of the statistically optimal cylindrical nearfield acoustic holography has also been developed.

In chapter four, the statistically optimized method based NAH has been brought into the spherical coordinates, and the statistically spherical interior and exterior nearfield acoustic holography have been developed. Samely, the acoustic field separation in the spherical coordinates has also been developed.

In chapter five, the theoretical basis and description to determine solution has been given, and the basic formulation of WSA has been deduced. Based on this, the holographic reconstruction and prediction formulations of the WSA based NAH have been built. The ill-posed nature of the holographic process and its regularization strategy has been investigated deeply. Several regularization approaches as well as several regularization parameter selection methods have also been introduced.

The routine wave superposition approach cannot be used in reconstruction and prediction of a coherent acoustic field, because it is impossible to separate the pressure generated by individual sources. A novel method based on the combined wave superposition approach is developed to reconstruct and predict the coherent acoustic field in chapter six.

In chapter seven, by taking the reflected pressure into consideration, the acoustic holography of the semi-free field based on the wave superposition approach is proposed to realize the holographic reconstruction and

prediction of the semi—free acoustic field, and the wave superposition approach is adopted as a holographic transfer algorithm.

In chapter eight, anacoustic measuring device has been designed. Using this device as a helpful tool, the acoustic field radiated from a clamped point—driven steel plate is investigated with the statistically optimal planar nearfield acoustic holography.

In chapter nine, researches in this dissertation have been summarized, and the topics need further study have been proposed.

Keywords: Acoustic holography, Statistically optimized, Wave superposition approach, Combined wave superposition approach, Inverse problem

目 录

第 1 章 绪 论	(001)
1.1 近场声全息技术(NAH)的诞生	(002)
1.1.1 全息术简介	(002)
1.1.2 传统的声全息技术	(003)
1.1.3 近场声全息技术(NAH)	(004)
1.2 NAH 的发展历程、研究现状和未来的发展趋势	(005)
1.2.1 全息变换算法的发展	(005)
1.2.2 全息面声场信息的测量方法	(013)
1.3 NAH 研究中仍存在的一些问题	(015)
1.4 本文的主要研究内容	(017)
1.5 本章小结	(018)
第 2 章 统计最优平面近场声全息理论及实验研究	(019)
2.1 基于空间声场变换的平面近场声全息	(020)
2.2 统计最优平面近场声全息技术	(022)
2.2.1 重建与预测公式的证明	(022)
2.2.2 波数矢量的确定	(025)
2.2.3 空间声场分离	(027)
2.3 数值仿真与分析	(029)
2.3.1 SOPNAH 理论和波数矢量选择方法的正确性	(029)
2.3.2 窗效应和卷绕误差的克服	(031)
2.3.3 声场分离的可行性和准确性	(032)

2.4	实验研究	(035)
2.5	本章小结	(038)
第3章	统计最优柱面近场声全息技术	(039)
3.1	柱面 NAH 的理论背景	(040)
3.2	统计最优柱面外声全息	(042)
3.2.1	重建与预测公式的建立	(042)
3.2.2	叠加系数矩阵的确定	(045)
3.2.3	数值验证	(046)
3.3	统计最优柱面内声全息	(048)
3.3.1	重建与预测公式的建立	(048)
3.3.2	叠加系数矩阵的确定	(049)
3.3.3	数值验证	(050)
3.4	声场分离技术	(051)
3.4.1	分离公式的推导	(051)
3.4.2	可行性和正确性验证	(052)
3.5	本章小结	(053)
第4章	统计最优球面近场声全息技术	(055)
4.1	球面 NAH 的理论背景	(056)
4.2	统计最优球面外声全息技术	(057)
4.2.1	重建与预测公式的推导	(057)
4.2.2	叠加系数矩阵的确定	(060)
4.2.3	数值仿真	(060)
4.3	统计最优球面内声全息技术	(061)
4.3.1	重建与预测公式的推导	(061)
4.3.2	数值验证	(063)
4.4	统计最优球面声场分离技术	(064)
4.4.1	分离公式推导	(064)
4.4.2	可行性和正确性验证	(066)

4.5 本章小结	(067)
第5章 波叠加方法在声辐射和声全息中的应用	(068)
5.1 振动体声辐射问题的描述	(069)
5.2 声辐射计算中的波叠加方法	(071)
5.2.1 波叠加积分方程	(071)
5.2.2 数值实现过程的讨论	(072)
5.3 声场重建与预测过程中的波叠加方法	(075)
5.3.1 重建与预测公式的建立	(075)
5.3.2 全息重建问题的不适定性	(076)
5.3.3 全息过程中的正则化方法	(078)
5.3.4 正则化参数的选择	(081)
5.4 全息重建问题的实验验证	(083)
5.5 本章小结	(086)
第6章 基于联合波叠加方法的相干声场全息重建与预测技术	(088)
6.1 常规波叠加方法在相干声场重建中的局限性	(089)
6.2 基于联合波叠加方法的相干声场全息重建与预测技术	(091)
6.2.1 单全息面法	(091)
6.2.2 多全息面法	(092)
6.3 数值仿真和实验验证	(093)
6.3.1 数值仿真	(093)
6.3.2 实验验证	(094)
6.4 本章小结	(102)
第7章 基于波叠加方法的半自由声场全息技术研究	(103)
7.1 常规基于波叠加方法的声全息技术在半自由声场重建中的局限性	(104)
7.2 基于波叠加方法的半自由声场全息理论模型	(106)
7.2.1 刚性反射平面	(106)

7.2.2 非刚性反射平面	(108)
7.2.3 数值仿真	(109)
7.3 本章小结	(111)
第8章 声学测量装置的研制及其在全息实验中的应用	(112)
8.1 声学测量装置的研制	(112)
8.1.1 整体方案设计	(112)
8.1.2 机械结构和传动方案设计	(112)
8.1.2 电气控制原理	(114)
8.2 点激励固支无障板辐射声场的全息研究	(116)
8.3 本章小结	(125)
第9章 全文总结与展望	(126)
9.1 总 结	(126)
9.1.1 基于统计最优方法的近场声全息技术研究	(126)
9.1.2 基于统计最优方法的空间声场分离技术研究	(127)
9.1.3 基于联合波叠加方法的相干声场重建与预测技术研究 ...	(127)
9.1.4 基于波叠加方法的半自由声场全息技术研究	(128)
9.1.5 声学测量装置的研制及应用	(128)
9.1.6 点激励固支无障薄板辐射声场的全息研究	(129)
9.2 展 望	(129)
参考文献	(131)

第1章 绪 论

随着生活质量、环境意识和人们对噪声危害认识的逐步增强,环境和产品的噪声问题越来越受到民众的关注。噪声污染、大气污染、固体废弃物污染以及水污染是当代社会最主要的四种污染。噪声污染同其他三种污染不同,它不存在时间上的积累效应,声源停止发声时伴随的噪声污染也就马上消失,但其影响面非常广,几乎影响到社会生活中的每个人,是受到人们抱怨和投诉最多的污染类型。在全国很多城市的环境污染投诉中,噪声污染投诉在很长时间内都稳居第一。所以如何提高环境、产品的噪声水平和声音品质成为声学研究领域亟待解决的问题,它与人们生活、社会经济发展密切相关。近些年来,世界各国在噪声控制技术和设备上的投入不断增加,同时也出台了很多的强制性政策、法规来限制噪声排放,以保证人们生活和社会生产的顺利进行。

进行环境和产品的噪声控制,一般从声源控制、传播途径控制和接受者保护三方面进行。其中声源控制是噪声控制中最根本和最有效的手段,它从根本上改变声源的噪声辐射特性,为减少声源的噪声辐射和提高声源辐射声音的品质提供了可能。而从声源入手进行噪声控制,第一个同时也是最关键的问题,就是声源的准确识别和定位,以获得声源的辐射特性;同时也要能正确地预测由声源所引起的空间声场分布,以使得随后所采取的噪声防治措施更合理,也就是要能同时实现空间声场的预测和可视化。而传统的声压和声强测量技术显然不能很好地满足这些要求,这就对从事噪声控制技术和设备研究的学者和工程技术人员提出了新的挑战。

20世纪80年代初,美国宾夕法尼亚大学学者提出了近场声全息技术(Near-field Acoustic Holography, NAH),它通过测量靠近声源的一个二维平面上的复声压场,便可以重建与预测整个三维空间的声学量(如声压、质