

斛兵博士文丛

HUBING BOSHI WENCONG

合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

基于波叠加方法 的声全息技术 与声学灵敏度分析

著 于 飞 ○ 导师 陈心昭

合肥工业大学出版社



■ 策划编辑 马国锋
■ 责任编辑 郑 洁
■ 封面设计 陈新生

ISBN 978-7-81093-868-6



9 787810 938686 >

定价：28.00 元

合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

基于波叠加方法的声全息技术与声学灵敏度分析

著 于 飞 导师 陈心昭

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于波叠加方法的声全息技术与声学灵敏度分析/于飞著. —合肥:合肥工业大学出版社,2008.12

(斛兵博士文丛)

ISBN 978-7-81093-868-6

I. 基… II. 于… III. 机械振动—噪声控制 IV. TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195465 号

基于波叠加方法的声全息技术与声学灵敏度分析

于 飞 著 策划编辑 马国锋 责任编辑 郑 洁

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2008 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2008 年 12 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038	印 张	13
	发行部:0551-2903198	字 数	199 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-81093-868-6

定价:28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枏巍

副主任委员：陈心昭 赵 韩

委 员（按姓氏笔画为序）：

史铁钧 刘全坤 陈心昭

张崇巍 杨伯源 费业泰

赵 韩 钟玉海 徐枏巍

出版编辑委员会

主任委员：吴玉程 马国锋

委 员：朱 红 王其东 高 隼

孟宪余 王 磊 李军鹏

黄 飞 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2007年度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，得到了校学位委员会、学术委员会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

2008年12月

总 序

当今世界科学技术突飞猛进，知识经济飞速发展，以经济和科技为基础的综合国力的竞争日趋激烈。而科技的竞争、经济的竞争乃至综合国力的竞争，归根结底是人才的竞争。面对新的形势、新的要求，党中央先后作出了实施“科教兴国”、“人才强国”战略和走自主创新道路，建设创新型国家的重大决策。胡锦涛同志在党的十七大报告中又提出，建设人力资源强国和创新型国家是我国全面夺取建设小康社会新胜利的两大新目标。高等学校是国家创新体系的重要组成部分，肩负着培养自主创新型人才的历史使命。研究生教育处于高等教育的最高层次，是国家培养高层次创新型人才的主要渠道。研究生，特别是博士研究生的科研工作，一般处于本学科的前沿，具有一定的创造性。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，为他们的尽快成才搭建平台，学校经过精心策划，编辑出版了《斛兵博士文丛》。

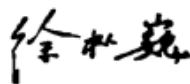
此次入选《斛兵博士文丛》的论著，均为2007年毕业并获得博士学位的博士研究生学位论文，是在广泛动员、严格把关的基础上，根据质量第一、公平公开、规范评审的原则认真遴选出来的。同时这些论著注重坚持基础研究与应用研究并举，是兼顾

理论价值与实践意义的最新研究成果。可以说，这套《斛兵博士文丛》（第二卷）虽然也可能有这样或那样的不足，但基本反映了我校博士研究生所具有的坚实的理论基础、系统的专门知识，以及较高的学术造诣和分析能力；体现了他们崇尚学术、追求真理、勇于创新的科学精神，实事求是、严谨认真的治学态度，不断进取、追求卓越的学术品格；展现了我校“勤奋、严谨、求实、创新”的校风学风。

建校63年来，学校充分发挥人才培养、科学研究和服务社会的功能，为国家和社会培养了一大批杰出人才，一代又一代的莘莘学子在这里勤奋耕耘、茁壮成长。出版《斛兵博士文丛》也是我校实施研究生教育创新工程、培养研究生创新精神、提高研究生创新能力的一个重要举措。合肥工业大学经过63年的建设和发展，逐步形成自身的办学特色，也取得许多令人瞩目的成就。我们正在不断改善办学条件，逐步完善相关政策，营造有利于高层次创新型人才尽快成长的良好环境，确保学校多出人才、快出人才、出好人才。

我衷心希望广大研究生特别是博士研究生，发扬我校优良的传统、校风、学风，在合肥工业大学自由宽松、开放和谐、充满生机和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、科研创新能力和综合实力作出更大的贡献，努力把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



二〇〇八年十一月

致 谢

时光飞逝,在四年多攻读博士学位的学习和研究生活即将结束之际,众多的老师、同学、朋友和亲人对我的指导、关心和支持使我难以忘怀!

论文是在导师——陈心昭教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。从培养计划的制订,到研究课题的选择,到具体的理论和实验研究,以及博士论文的撰写和修改,都渗透着恩师辛勤的汗水和谆谆的教导。导师严谨求实的治学精神、博大精深的学术造诣、甘为人梯的学者风范和虚怀若谷的长者胸襟,时时刻刻地激励着我努力探索、永远向前。在以后的漫漫人生旅途中,要以导师为榜样,谨记导师的教诲,努力拼搏,奋勇前进,不辜负导师的厚望。

特别感谢陈剑教授,在课程学习、课题研究、实验方案制订、论文撰写过程中,给予的大力指导和不懈帮助。同时,陈剑老师精辟的学术观点、认真的工作作风、诲人不倦的教育方式,使我受益匪浅。

衷心感谢合肥工业大学振动与噪声研究所的刘正士教授、李志远教授、许滨高工、陈晓东老师、陆益民老师,在这几年来给予我的指导和关怀。

衷心感谢周广林、毕传兴、徐晓军、陈品、郑海波、王秀峰、李卫兵、吴振华、赵旭东、贺春东、张永斌、徐亮等师兄弟和陈恩伟、费维等同学提出的宝贵意见和帮助。

衷心感谢我在合肥工业大学八年多学习、生活中所有认识和给予我帮助的老师、领导、同学和朋友们。

借此机会,我要感谢辛勤养育我的父母和我的岳母。正是由于他们的理解和支持,才能使我专心于博士论文的研究工作。还要感谢我的兄弟姐妹们给我带来了欢乐和学习的动力。

最后,我要最衷心地感谢我的妻子王爽,感谢她陪我共同经历风风雨雨,感谢她在生活上给予的无微不至的关心,感谢她多年来对我学习和工作的默默支持。正是她辛勤的工作和无私的奉献,才使得本论文得以顺利完成!

于 飞

2007年6月

摘要

本文围绕产品噪声测量与控制这一日益受到关注的课题,开展了关于近场声全息技术(NAH)和声学灵敏度分析方面的研究。近场声全息技术,诞生于20世纪80年代初,通过在辐射体的近场测量声压数据可以重建和预测出整个三维空间声场的声学量,如声压、质点振速、声强以及远场指向性等。因其具有此优点,近场声全息技术迅速地成为一种声源识别和声场可视化的强有力工具。在过去的20多年中,该技术也取得了很大的发展,形成的全息变换算法主要有:空间声场变换(STSF)、边界元方法(BEM)和Helmholtz方程最小二乘法(HELS)。本文在实现和改进基于STSF方法的NAH基础上,提出了空间声场分离技术,为克服BEM和HELS方法的缺点,提出可应用于内、外声辐射问题分析的基于波叠加方法(WSA)的NAH。而在声学灵敏度分析方面,本文通过对波叠加公式进行关于设计变量的求导,提出基于波叠加方法的三维声学灵敏度分析。每章内容简要概括如下:

第1章回顾近场声全息技术和声学灵敏度分析的发展历史,分析了二者的研究现状和存在的问题,在此基础上提出了这些问题的解决途径,确定了本文的主要研究内容。

第2章实现基于STSF的近场声全息技术,解决该技术中的若干关键问题。采用特殊函数和分离变量法推导出平面、柱面和球面NAH的理论公式,并讨论它们的数值实现算法,以及全息重建过程中的误差传递。最后,进行扫描全息测量的实验验证工作,提出一种不需要先验或后验知识的截止波数选取方法。

第3章提出空间声场分离技术,拓宽基于STSF的近场声全息技术的使用范围。从近场声全息原理出发,利用声波沿不同方向传播的特点,针对平面、柱面和球面全息测量建立了波数域内的声场分离公式。利用声场分离

技术分离后的全息声压,可以不受背景干扰地重建目标源面上和声场中的声学参量。

第4章给出声辐射问题的声学基础和定解问题描述,推导出边界 Helmholtz 积分方程,随后给出了边界 Helmholtz 积分方程的离散化形式——边界元方法,以及在离散化实施过程中存在的问题和相应的处理方法。在此基础上,推导出波叠加方法的基本公式,论证了波叠加方法和边界元方法之间的等价性关系,最后给出波叠加方法的实施过程和精度分析。

第5章提出基于波叠加方法的近场声全息技术。依据波叠加积分公式,通过离散化连续虚源方法来改进简单源替代方法,并引入混合层势理论,建立了一种稳健的全波数空间声场重构技术。研究声全息重建过程中的不适定性问题,以及相应的正则化策略。通过典型算例和实验验证了理论分析的正确性,并研究了声源频率及虚源位置等对重构精度的影响。

第6章推导出腔体内声场计算的波叠加积分公式,并建立基于 WSA 的腔体内声全息理论和采用等参插值离散虚源表面的全息实现方法。通过几个典型算例对腔体内全息技术进行仿真验证,结果表明:在采用不同的正则化方法之后,即使采用含有测量误差的数据进行重构和预测,其计算结果与理论值都能吻合得相当好,其中采用 Tikhonov 方法比 TSVD 方法滤波效果稍好。

第7章建立基于波叠加方法的三维声学灵敏度分析理论和实现算法。根据波叠加方法建立空间点的声学量与产品结构表面上声学、位置参量之间的关系;然后,通过对设计参数的求导可以得到解析的三维声学灵敏度计算公式;最后,通过对该公式的离散化处理可以得到声学灵敏度计算方程。通过仿真算例,验证了基于波叠加方法进行声学灵敏度计算的可行性和有效性。

第8章对全文的研究工作进行总结,并指出了有待进一步研究的课题。

关键词:声源识别;噪声控制;声全息;声学灵敏度;低噪声设计;波叠加方法;逆问题;正则化滤波;声场分离

ABSTRACT

Since noise measurement and control engineering are attracting more and more attentions, near-field acoustic holography (NAH) and acoustic sensitivity analysis have been investigated in this dissertation. Near-field acoustic holography which was proposed in the beginning of 1980s, can reconstruct and predict acoustic quantities such as sound pressure, particle velocity, sound intensity and far-field directivity in the whole 3-D field without the resolution limitation by recording the sound pressure in the near-field of radiator. Because of such special features, the NAH technique becomes one of the most powerful tools to identify sound sources and visualize sound field. Meanwhile, the technique have achieved many progresses in itself, and its implementation algorithms mainly consist of spatial transform of sound field (STSF), boundary element method (BEM) and Helmholtz equation least-square method (HELs). Based on the implementation and enhancement of the STSF-based NAH, sound field separation technique has been proposed in this dissertation. In order to overcome the shortcomings of the BEM and HELs based NAH, wave superposition approach (WSA) based NAH has been proposed and applied to the analysis of interior or exterior sound field. As far as acoustic sensitivity analysis, wave superposition approach (WSA) based acoustic sensitivity analysis has been proposed by differentiating wave superposition formulation with respect to design variables. The main contents in the dissertation are summarized as follows:

In Chapter One, the history of NAH and acoustic sensitivity analysis

has been reviewed, and the current status and problems existing in them have also been analyzed. Then the solutions to these problems have been presented and the main research content has been determined in the dissertation.

In Chapter Two, the STSF-based NAH has been implemented and some problems of it have been solved. The theoretical formula of planar, cylindrical and spherical NAH have been deduced according to special function and variable-separating method. Meanwhile, the numerical algorithm and error transmission have been discussed in this chapter. Finally, an experiment using scanning holographic pressures has been conducted, where a cut-off wave-number determination method has been proposed without prior or post knowledge.

In Chapter Three, sound field separation technique has been proposed, which widens the applicable scope of the STSF-based NAH. According to the NAH theory and propagating characteristics along different directions, sound field separation technique can be established in the wave-number domain. The acoustic quantities on the target source surface and in the field can be reconstructed without the influence of the background noise using the separated pressures.

In Chapter Four, the theoretical basis and description to determine solution has been given, and Helmholtz integral equation and its numerical form that is boundary element method have been deduced. Based on these, the basic formulation of WSA has been deduced and its equivalence to BEM has been verified. In the end, the implemented process and precision analysis have been given.

In Chapter Five, the WSA-based NAH has been proposed. According to wave superposition formula, a robust reconstruction method has been established for all wave numbers by introducing hybrid layer potential theory. The ill-posed nature of holographic process and its regularization strategy has been investigated deeply. The correctness of theoretical

analysis has been verified through numerical simulations and experiments. In addition, influence of frequency and factitious source position to reconstruction precision has been investigated.

In Chapter Six, wave superposition formulation in cavity has been deduced, and the WSA-based interior NAH and its implementation method using isotropic parameter interpolation have been established. The results of several typical simulations show that the calculated result can coincide with the theoretical values very well after regularization, even if the data including measurement errors is used to reconstruct and predict, and the Tikhonov method can obtain a little bit better effect than the truncated singular value decomposition (TSVD) method.

In Chapter Seven, the 3-D acoustic sensitivity analysis theory and its implementation algorithm have been developed. According to WSA, the relation between acoustic quantities in field and acoustic and spatial parameters on product surface can be established. Then the analytical formulation of acoustic sensitivity analysis can be obtained by differentiating with respect to design parameters. Finally, the calculation equation can be obtained through the discretization of the analytical formulation. Several simulations have been taken to test the feasibility and effectiveness of the WSA-based acoustic sensitivity analysis.

In Chapter Eight, researches in this dissertation have been summarized, and the topics needing further study have been proposed.

Key Words: Sound source identification; Noise control; Acoustic holography; Acoustic sensitivity analysis; Low-noise design; Wave superposition approach; Inverse problem; Regularization method; Sound field separation

目 录

总序	(001)
致谢	(001)
摘要	(001)
第 1 章 绪论	(001)
1.1 声全息技术的研究进展	(002)
1.1.1 传统声全息技术	(003)
1.1.2 近场声全息技术	(004)
1.2 NAH 的研究进展与分析	(005)
1.2.1 基于空间声场变换(STSF)的 NAH	(005)
1.2.2 基于边界元方法(BEM)的 NAH	(009)
1.2.3 基于 Helmholtz 方程最小二乘法(HELS)的 NAH	(012)
1.2.4 全息测量方法和测量系统	(013)
1.2.5 NAH 研究中仍存在的问题	(017)
1.3 声学灵敏度分析	(019)
1.4 本文主要研究内容	(022)
第 2 章 基于 STSF 的近场声全息技术研究	(024)
2.1 平面 NAH 变换研究	(025)
2.1.1 平面 NAH 的理论背景	(025)
2.1.2 G 算子和波数域滤波	(027)

2.1.3	参数选取和仿真模拟分析	(028)
2.2	柱面 NAH 的研究	(032)
2.2.1	柱面 NAH 的理论背景	(032)
2.2.2	柱面 NAH 的数值实现	(034)
2.2.3	仿真模拟分析	(036)
2.2.4	误差分析与滤波处理	(037)
2.3	球面 NAH 的研究	(039)
2.3.1	球面 NAH 的理论背景	(040)
2.3.2	实现算法与误差分析	(042)
2.3.3	仿真算例与分析	(044)
2.4	NAH 的实验研究	(046)
2.4.1	理论背景	(046)
2.4.2	实验测量	(047)
2.4.3	分析处理	(049)
2.5	本章小结	(053)
第 3 章	空间声场分离技术及其应用	(054)
3.1	平面声场分离技术	(055)
3.1.1	双平面声场分离技术	(055)
3.1.2	数值仿真分析	(057)
3.1.3	单平面声场分离技术	(060)
3.1.4	数值仿真分析	(062)
3.2	柱面声场分离技术	(065)
3.2.1	双柱面声场分离技术	(065)
3.2.2	单柱面声场分离技术	(067)
3.2.3	数值仿真分析	(067)
3.3	球面声场分离技术	(070)
3.3.1	双球面声场分离技术	(071)
3.3.2	单球面声场分离技术	(072)
3.4	声场分离技术的实验研究	(073)

3.4.1 实验数据测量	(073)
3.4.2 实验数据处理	(075)
3.5 本章小结	(077)
第4章 振动体声辐射计算的波叠加方法	(078)
4.1 振动声辐射问题的声学基础	(079)
4.2 振动声辐射问题的求解	(081)
4.2.1 边界积分公式	(081)
4.2.2 边界 Helmholtz 积分方程	(085)
4.3 振动声辐射计算的边界元方法	(088)
4.4 振动声辐射计算的波叠加方法	(092)
4.4.1 波叠加积分方程	(092)
4.4.2 数值实现	(095)
4.4.3 数值计算误差分析	(097)
4.5 本章小结	(100)
第5章 基于波叠加方法的声全息技术	(101)
5.1 简单源替代的波叠加方法	(102)
5.1.1 简单源替代波叠加方法实现的声全息理论	(102)
5.1.2 数值仿真算例	(105)
5.2 全息重建问题的不适定性与正则化技术	(108)
5.2.1 全息重建问题的不适定性	(108)
5.2.2 全息过程中的正则化技术	(111)
5.2.3 实验验证	(116)
5.3 解的非唯一性处理与参数选取原则	(119)
5.3.1 解的非唯一性问题	(120)
5.3.2 数值实现	(121)
5.3.3 数值算例与分析	(122)
5.4 长宽高比例较大声源的实验验证	(127)
5.5 本章小结	(130)