KUAISU ZAOSHENG ZHENDUAN JISHU

——HELS FANGFA DE LILUN JI GONGCHENG YINGYONG YANJIU

快速噪声诊断技术

——HELS方法的理论及工程应用研究

杨瑞梁 著

黄河水利出版社

中原工学院学术专著出版基金资助

快速噪声诊断技术

——HELS方法的理论及工程应用研究

杨瑞梁　著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

快速噪声诊断技术——HELS方法的理论及工程应用研究/杨瑞梁著.—郑州:黄河水利出版社,2006.9
ISBN 7-80734-127-0

Ⅰ.快…　Ⅱ.杨…　Ⅲ.噪声-诊断技术-研究
Ⅳ.TB53

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第102863号

策划组稿:王路平　电话:0371-66022212　E-mail:wlp@yrcp.com

出 版 社:黄河水利出版社
　　地址:河南省郑州市金水路11号　　邮政编码:450003
发行单位:黄河水利出版社
　　发行部电话:0371-66026940　　传真:0371-66022620
　　E-mail:hhslcbs@126.com
承印单位:黄河水利委员会印刷厂
开本:850 mm×1 168 mm　1/32
印张:6
字数:150千字　　印数:1—1 200
版次:2006年9月第1版　　印次:2006年9月第1次印刷

书号:ISBN 7-80734-127-0/TB·15　　定价:15.00元

前　言

噪声污染已成为举世瞩目的一大公害,采取相适应的现代技术控制噪声,乃是环境保护和劳动保护工作者所面临的重要任务之一。但噪声污染又不同于其他类型的污染,要进行噪声控制,达到治标治本的目的,必须首先研究噪声的发生机理。鉴于在不影响声源的情况下测量声源表面声振情况的实验方法比较困难,因此研究噪声发生机理,就需要根据声场中较易测量的较少声场信息,来快速、准确地确定出整个声场或声源表面的声振信息,HELS方法就是这样一种快速噪声诊断方法。

HELS方法是把声场中声压转化为一系列线性无关的球谐函数叠加,然后,使用最小二乘法,根据已知的噪声信号来重建声源表面的振动情况。其实质是寻找一个在整个声场领域都通用的、极为简单的声压函数,并要求当声场确定时,此声压函数只与位置有关。因此,只要测量声场中较少点的声学信息,通过这种方法就能快速、高效地重建出整个声场的声学信息或是声源表面的振动情况,该方法重建声场高效、简单、灵活,并且没有边界元方法在特征波数不唯一的缺点。通过适当选择,该方法的计算精度和计算效率都可以很高,并且应用方便。因此,该方法在快速噪声诊断的工程实际中很值得推广。

本书详细介绍了这种方法的理论推导过程,并通过

多种观点推广了这种方法。通过具体实例，分析了这种方法及推广方法的精度与精度的影响因素，在此基础上，界定了各种方法的适用范围。本书使用这些方法模拟了一些工程实际中可能遇到的一些问题。在本书的最后部分，详细分析了HELS方法的一些局限性，并据此提出了一些相应的对策。在HELS方法的基础上，提出了更适合工程实用的快速噪声诊断技术。

本书是作者对硕士学位毕业论文的进一步总结和充实，部分内容是作者攻读硕士学位期间的科研成果。在此，向作者的导师姜哲教授表示感谢。本书的编写，注重吸收国际上最新的研究成果，并通过作者自己的理解，由浅入深，详细地展现出来。其中的大部分内容为作者近5年来对HELS方法的研究成果汇集。

由于本人的水平和经验有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

本书的编写，得到了家人、领导和同事的关心、帮助和热情支持，在此谨表示感谢！

作　者

2006年7月于郑州

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

第1章 绪 论

当物体受振动后，在弹性媒质中以波动的形式向外传播，当传到人耳能引起音响的感觉，则这种受振动物体称为声源，在弹性媒质中传播的波称为声波。声波存在的空间称为声场。一个受振动而发声的声源和它形成的声场之间的相互作用问题一般可归纳为声辐射问题和声辐射逆问题。

1.1 声辐射问题

弹性物体、激励力和弹性媒质形成一个声辐射系统。弹性物体受激励力振动会激励周围的媒质质点振动，由于媒质质点的可压缩性，周围的媒质质点就产生交替的压缩和膨胀过程并向外传播，这个过程被称为声波的传播。有关声波传播的问题就称为声辐射问题。

对上述声辐射问题的研究主要有三种方法：几何声学方法、统计声学方法和波动声学方法。

几何声学方法借鉴几何光学理论，假设声音沿直线传播，并忽略其波动特性，通过计算声音传播中能量的变化及反射到达的区域进行声场模拟。这种方法计算精度不高，而且高阶反射和衍射的计算量巨大，然而原理简单，易于理解。

统计声学方法是从能量的角度，研究在连续声源激发下声能密度的增长、稳定和衰减过程（即混响过程）。这种方法主要研究波长非常小、在某一频率范围内简正振动方式很多、频率分布很密时、忽略相位关系、只考虑各简正振动方式的能量相加问题。

上述两种方法忽视了声音的波动特性，因此无法对声波的波

动特性进行模拟,如声波的衍射、绕射等。在低频段,声波的波长较长,能够越过高频声波不能越过的障碍物,因此上述两种方法求解低频声学问题时比较困难。工程实际中,一般把上述两种方法结合起来对实际的声辐射问题进行近似的设计计算。例如,在建筑声学设计中,可以使用几何方法计算早期反射,而使用统计模型来计算后期混响。

波动声学方法用波动的观点研究声学问题。弹性媒质中的声场可以用波动方程在特定条件下的解来描述。这种波动方程能够揭示声场的本质,可以阐述几何声学方法和统计声学方法的适用范围以及解释一些满足特定声场条件而出现的声学过程。本书研究的 HELS 方法属于波动声学方法的范畴。

一般研究的声辐射问题是已知振动物体的表面振速来确定物体的表面声压和声场特性。如果使用波动声学的方法,对大多数的表面形状比较复杂的振动声源难以求解辐射声场的解析解,因此需要使用数值方法来求解这类问题。

最初,研究学者使用差分法,按差分格式离散以获得数值解;还有学者按问题的特点,采用里兹法或伽辽金法等近似方法来获得近似解,这些近似方法总有这样或那样的缺点而不能令人满意。

20 世纪 50 年代问世的有限元法简单直观、易于掌握,而且适用范围广、数值精度较高,但它和有限差分法一样,需要大量的内存和计算时间。最初这种方法局限于形状不太复杂或比较规则声源的声场分析;并且,应用这种方法来求解自由空间的声辐射问题的另一个缺点是无限的外部领域必须通过有限的领域来近似,而这种由于假定而造成的误差很难消除。近年来,不少学者提出了多种解决办法。

60 年代有些学者开始使用边界元法[1]来研究声辐射问题。相对于以前的方法,边界元法求解声辐射问题的主要优势是:它基于一个数学逻辑公式,也就是 Helmholtz 积分方程,此方程自动满

足 Sommerfeld 无穷远辐射边界条件,另外,问题的维数减少 1,这些使得边界元法的计算量大大降低。目前,边界元法的数学理论日益完善,应用范围日益拓宽,并且有许多功能齐全的边界元法通用程序包。经典边界元法的缺点是某些频率下,方程的解不唯一。为解决这一问题,许多学者提出了改进方法。

无限元法,是基于声辐射 Helmholtz 微分方程,应用于物体表面的外部领域的半无限表面。近 10 年来,无限元在声学中应用的研究极为活跃,新的研究分支不断出现和完善。目前,无限元的应用已扩展到众多领域,其涉及范围包括:电、磁、声、水动力学、弹性力学、量子力学、黏弹塑性力学、弹性媒质中的波、表面波、固体、地质、热、光、微波、振动、流体结构耦合、动态弹性问题、时域问题等。关于该方法的较详细介绍请参阅文献[2]、[3]。

还有一些学者提出了其他的一些数值计算方法,如波叠加法[4-7],本书与这一方法有一定的关系。同时还有一些学者把不同的数值方法联系起来求解声辐射问题,取得较满意的效果。

1.2 声辐射逆问题

仅仅研究声辐射问题并不能满足工程应用的需要。例如,在工程实践中,经常要求根据事先提出的声场要求来设计声源;在进行低噪声优化设计时,同样经常根据需要寻找所能达到的声场效果和花费代价之间的最佳权衡;在实际声学环境中,有时需要根据声场情况分析出某一待分析声源表面的情况,为对声源进行适当处理做准备。

此类问题被 Turchin 等[8]归类为"声辐射逆问题",它们的共同特点是:声场已知而声源未知。逆问题作为一个广泛的研究课题已经持续了几十年,并且有详细的文献介绍,但对声辐射逆问题的研究相对较晚。

20 世纪 80 年代中后期,最初的学者开始通过近场全息和快

速傅立叶变换组合的一般近场全息方法来重构平面源表面声场[9~11]、柱表面源声场[12,13]、封闭声源的几何表面声场[14]以及任意形状的声源[15]。在上述算法的基础上，Sarkissian 提出的实函数算法[16~18]同时适用于近场和远场全息。张德俊等在这种方法的理论和实验研究上也做了一些工作[19~21]。

使用有限元法来求解声辐射逆问题，需要对整个边界进行离散，计算量较大，因此这种方法仅见运用于低频较小空腔声源或可以测得微粒振速的声源[22]。

进入 90 年代以来，有些学者开始使用边界元法[23~27]来研究表面形状不规则的声源的声辐射逆问题。Chao[28]使用最小二乘法通过使与积分方程相关联的误差最小以近似重构源表面声场。Gardner 和 Bernhard[29]运用边界元方法来求解一个空腔内的声辐射逆问题，得出的重构误差与外部问题的重构误差是同样阶次的。张桃红等[30]使用全特解场边界元法来求解声辐射逆问题，用脉动球来验证，结果比较理想。

1997 年，Wang 等提出使用 HELS 法[31~40]，把声场中声压转化为球谐函数的叠加，然后使用最小二乘法，根据已知的噪声信号来重建声源表面的声压。HELS 法实质上是寻找一个在整个声场领域都通用的、极为简单的声压函数，并要求当声场确定时，此声压函数只与位置有关。该方法重建声场高效、简单、灵活，并且没有边界元方法的特征波数不唯一的缺点。Wu 等[32,36]认为：HELS 法能够计算低频的球状声源的声场重建情况，计算高频误差则较大。1998 年，Wu 等[32]把这种方法应用于重建长、宽、高比约为1∶1∶1的物体的声源内部声场，并且也给出了在低频下部分振动柱的声场重建。2000 年、2001 年，Wu 等[33~35]分别使用模拟计算和实验研究对 HELS 法进行了验证。2002 年，Wu 等[37]通过联立 HELS 法和边界元方法中的边界积分公式，根据声场中较少的测量点，就可以重构出任意形状声源的声场。该快速噪声诊断方

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

法迄今为止已获得3项美国专利[38~40]。由于这种方法仅需要声场中较少的测量点就能达到重构声场的目的,计算效率极高,因此很有可能在工程实际中得到较为广泛的应用。本书将在后面章节详细介绍、拓宽、分析这种新方法。

总之,对声辐射逆问题的研究虽然起步较晚,但已取得了长足的进展。

1.3 快速噪声诊断

当工程机械在运行过程中,在其表面产生振动信号的同时,也往往激发噪声信号。而当其产生故障时,其噪声品质也会发生改变,因而利用噪声信号可以对机器故障进行诊断。实际上,在工厂的质量检验中,有经验的技术人员通过监听机器的噪声能大致判断机器是否存在影响其使用寿命的各种故障。目前在很多工业制造企业,“听声音,找故障”是工人的一项很重要的技能。

过去几十年中,出现了许多方法来处理这类问题。其中一种方法叫做声场空间转化方法,这种方法使用平面近场声全息方法来重构辐射声压场。然而,使用平面近场声全息方法,限制了声场空间转化方法只能用于两个平面之间,并且测量点必须在一个平面上等距离分布,而且测量缝隙必须大到足够装下一个能在45°角度内旋转的预设声源。这些限制严重地制约声场空间转化方法在工程中的应用,因为实际结构的表面经常是曲面,并且结构辅助部件的存在可能会反射声音或者辅助部件同测量声源的位置相重合而导致测量不能进行。因此,人们经常强迫使测量远离结构一定的位置,以避免这些障碍。这样,由于输入数据中近场信息的丢失而导致重构结果的准确性受到影响。

另一种方法是基于近场声全息方法的Helmholtz积分理论。这种方法目前处于理论研究阶段,还没有应用于工业生产中,主要是因为这种方法严重依赖空间形状,并且要求测量点必须取在研

究声源周围的完全封闭表面上。为了避免重构中的混淆现象，在声压场中，每个波长至少取样两次，测量点的数量必须与声源表面离散点的数量相当。而对于像发动机前部这样的复杂结构，表面离散点很容易达到成百上千个，并且由于对测量点的位置没有限制，包围声源表面的大量被测点很容易使重构过程缓慢而且花费代价昂贵。

而 HELS 方法仅需要测量声场中较少的声压，就可以较为准确、高效地重构出声场中其他点，特别是声源表面的声振情况。因此，HELS 方法在快速噪声诊断领域具有很高的研究和推广价值。

国内近年来关于噪声诊断的文献集中于从被环境噪声污染的声音信号中提取有效的信号特征。例如文献[55]提出了一种发动机噪声故障诊断的新方法。该方法在分析故障产生机理和噪声信号特征的基础上，构造一种新型的小波——指数衰减型小波函数，应用它对发动机噪声信号进行处理，提取表征故障的间歇性撞击声音信号特征。文献[56]以双谱分析理论为基础，分析并计算了车辆减振器不同振动信号的选择双谱。文献[57]针对噪声的不同情况，采取不同的措施和方法来降低液压齿轮油泵噪声。文献[58]针对国产电动机听觉上感到噪声偏高的问题，选择某型号电动机进行了噪声测试，采用对数自功率谱、倒频谱和小波分析等方法进行了分析，找出了人的听阈不悦的几个高谱峰位置。文献[59]提出了基于小波包和模糊聚类分析的连杆轴承故障的噪声诊断方法，在 EQ6100 型发动机上预先模拟连杆轴承故障，根据发动机故障时变、非平稳的特点，运用小波包对发动机噪声信号进行特征提取并削减了背景噪声的影响。

可以看出，国外学者在噪声诊断领域集中于理论研究工作，而国内学者则集中于噪声诊断的信号提取和工程应用工作。本书将详细研究 HELS 方法这种新型的快速噪声诊断技术的理论研究和工程应用。

1.4 本书的研究目的和主要内容

传统的噪声诊断技术不能满足很多工程实践快速、廉价的要求。于是,很多研究学者开始研究快速噪声诊断技术。本书顺应这一潮流,详细介绍快速噪声诊断新技术——HELS法,然后将这种方法推广,并应用于工程实践上的快速噪声诊断过程中。该方法的主要优点是:通过适当选择,计算精度和计算效率都可以很高。仅需要在声学现场使用声学测量仪器测量较少点的声学信息,就可以快速、高效地重构出声源表面或其他声场点的声学信息。因此,该方法相对于传统的快速噪声诊断技术,节省了大量的时间和费用。并且,该方法原理简单,应用方便,适宜推广。

本书研究的主要内容包括:

(1)详细介绍传统HELS方法。包括这种方法理论推导情况,并使用球谐函数作为独立函数的传统HELS方法求解了脉动球、摆动球和局部振动球的声辐射逆问题。

(2)推广传统的HELS方法。分别使用柱波函数、点源、偶极子源、长旋转椭球函数代替球谐函数作为独立函数,并通过例子验证了各种选择方法的合理性。

(3)分别讨论了上述各种方法的精度,以及精度的影响因素和适用范围。通过具体实例分析了各种方法特定条件下的精度影响因素,在此基础上,界定了各种方法的适用范围。

(4)HELS方法的应用研究。使用HELS方法求解一些工程实例,来研究这种方法在工程应用中的可行性。

(5)HELS方法的局限性研究。研究HELS方法理论上的局限性,并提出一些相应的对策。

(6)拓展HELS方法。在HELS方法的基础上,和其他一些方法联合,来形成更为适合工程实用的快速噪声诊断技术。

第 2 章 HELS 方法

前面已经提到，声辐射逆问题就是基于已知声场寻找声源有关性质的问题。声辐射逆问题的一个很常见的例子，就是基于声场中可以测量到的声压信号来确定声源的表面特性。本章就这一问题做一定的探讨。

本章将详细介绍用于求解声辐射逆问题的 HELS 方法的基本原理，使用球谐函数作为独立函数的 HELS 方法首先求解了一些球状声源的实例，并分别使用柱波函数、点源、偶极子源、长旋转椭球函数代替球谐函数作为独立函数，然后使用新的 HELS 方法来求解一些实例。

2.1 声辐射逆问题

当弹性媒质的某局部区域因某种原因激发一扰动时，由于媒质的弹性和惯性作用，这种最初的扰动就由近及远地传播，形成声场，最初激发扰动的物体就是声源。显然，声源的振动性质是影响声场特性的主要因素，声源发生变化，声场也会跟着变化；同样，如果已知声场发生了变化，也可以认为是声源表面振动情况发生了变化。如果要求根据声场的特性来确定声源的振动情况，这类问题就是前面所述的声辐射逆问题。为求解声辐射逆问题，就必须深入地研究声源和声场之间的对应关系。

设无限均匀媒质中，振动物体（即声源）的表面为 S，声源内部表示为 D^+，声源外部表示为 D^-，振动表面某一点的外法向矢量表示为 n_S，如图 2-1 所示，则声辐射 Helmholz 微分方程为：

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \tag{2-1}$$

式中：P 表示声场中某一点的声压；k 表示波数，$k=\omega/c$，其中 ω 为角频率，c 为声速；∇^2 表示 Laplace 算子。

式(2-1)适用于声场中任意点(包括声源表面)。

在自由声场中，声场中声压满足 Sommerfeld 无穷远辐射边界条件：

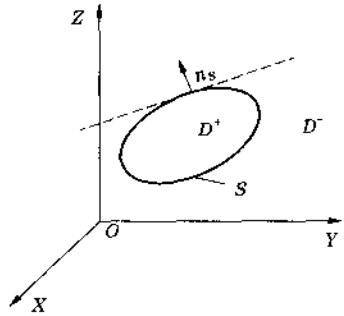

图 2-1 声场区域示意图

$$\lim_{r\to\infty}\left[r\left(\frac{\partial P}{\partial r}+\mathrm{i}kP\right)\right]=0 \tag{2-2}$$

式中：r 表示声场中某点离声源中心坐标(这个概念并非十分精确)的距离；i 表示虚数符号，$\mathrm{i}^2=-1$。

常研究的是 Nermann 问题，其中的边界条件由 Euler 方程给出：

$$\frac{\partial P}{\partial n_S}=-\mathrm{i}k\rho cv \tag{2-3}$$

式中：$\frac{\partial P}{\partial n_S}$ 表示对声源表面某点的声压外法向求导；ρ 表示媒质密度；v 表示某点的表面振速。

如果在式(2-3)中，已知声源表面振速，来求解声场中的声压分布，这类问题就是前面所说的声辐射问题；同样，已知声场中声压，声源表面振速未知，这类问题就归类为声辐射逆问题。

2.2 HELS方法的一般计算模型

Wang 等[31]指出，声场中(包括声源表面)任一点的声压能够用一组独立函数 ψ_i 的线性组合来表示：

$$P(x) = \rho c \sum_{i=1}^{N} C_i \psi_i(x) \tag{2-4}$$

Liberstein 等[41]指出：当项数 $N \to \infty$ 时，P 趋于声场声压的真值。式中：P 为声场中点 x 的声压；C_i 为系数权重；独立函数 $\psi_i(x)$ 线性无关，它的选择原则[31]是：

(1) ψ_i 满足微分方程式(2-1)和边界条件式(2-2)，但不满足边界条件式(2-3)；

(2) ψ_i 不满足微分方程式(2-1)，但满足边界条件式(2-2)，其中 ψ_i 满足边界条件式(2-3)，$\psi_2, \psi_3 \cdots$ 满足齐次的边界条件；

(3) ψ_i 满足边界条件式(2-2)，但既不满足微分方程式(2-1)，也不满足边界条件式(2-3)。

独立函数仅需满足上述条件之一。为使独立函数的项数较少，HELS 的独立函数的选择原则一般为(1)。

独立函数取法一定时，若已知系数权重 C_i 的值，则可求得声场中任一点的声压；同样地，如果已知声场中某些点的声压，可以通过求解系数权重 C_i，进而可求得声源的表面声压和表面振速，从而达到求解声辐射逆问题的目的。下面来详细讨论这种方法的基本原理。

2.2.1 独立函数的正交化

尽管选取的独立函数 $\psi_i(x)$ 线性无关，且满足微分方程式(2-1)和边界条件式(2-2)，但其并不满足边界条件式(2-3)。在某些情况下，例如选择的独立函数为球谐函数，而声源形状为椭球面，为使该独立函数能够更为合理地模拟声源的表面形状，此时需要通过 Gram-Schmidt 正交化的方法求得更为合理的独立函数：

$$\chi_{n+1} = \psi_{n+1} - \sum_{i=1}^{n} (\psi_{n+1}, \psi_i^*) \psi_i^* \tag{2-5}$$

其中，$(\psi_{n+1}, \psi_i^*) = \int_{\partial B} \psi_i \psi_j^* \, \mathrm{d}s$，$\psi_i^* = \chi_{n+1} / (\chi_{n+1}, \chi_{n+1})^{1/2}$，声源表

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com