



声学测量系列

水下弹性结构 噪声源识别技术

SHUIXIA TANXING JIEGOU ZAOSHENGYUAN SHIBIE JISHU

肖 妍 商德江 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

水下弹性结构噪声源识别技术

肖 妍 商德江 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

在实际工作中,要有效控制和降低水下航行器的辐射噪声,就必须了解其主要噪声源位置、贡献大小、主要能量传播方式和途径。因此,噪声源的识别与定位一直是水声领域的热点问题。

本书主要针对水下航行器的声辐射问题开展了水下复杂弹性结构噪声源识别方法研究,分别介绍了采用水下复杂弹性结构体进行表面源强度分析的声全息测试方法和结构内部力源定位识别的匹配场处理方法。

本书可用于相关专业的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水下弹性结构噪声源识别技术 / 肖妍, 商德江著.
—哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.6
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1551 - 5

I. ①水… II. ①肖… ②商… III. ①水下声源 - 噪声源 - 识别 - 技术 IV. ①TB561

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 151915 号

选题策划 付梦婷
责任编辑 张忠远 付梦婷
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 10
字 数 218 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷
定 价 34.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

在实际工作中,要有效控制和降低水下航行器的辐射噪声,就必须了解其主要噪声源位置、贡献大小、主要能量传播方式和途径。因此,噪声源的识别与定位一直是水声领域的热点问题。

本书主要针对水下航行器的声辐射问题进行了水下复杂弹性结构噪声源识别方法研究。全书分别介绍了采用水下复杂弹性结构体进行表面源强度分析的声全息测试方法和结构内部力源定位识别的匹配场处理方法。

本书由6章组成。第1章阐述了水下弹性结构噪声源识别方法的研究背景,从表面源强度及内部力源两个方面对水下弹性结构的噪声源识别方法进行综述,并对力源识别匹配场处理方法中的搜索算法发展情况进行介绍。第2章进行了水下弹性结构表面源强度声全息测试方法的理论研究,并针对边界元法声全息变换公式中的奇异积分问题,从声学角度开展理论研究,提出将一维声传播方程作为约束条件的处理方法,建立了一维声传播约束条件下的弱奇异积分方程。第3章对不同全息面参数情况下的表面源强度声全息重构精度进行分析,并讨论重建精度对不同声场参数条件的敏感性,并考虑实际工程应用,提出了双平面结合一维声传播方向声场测点的近场声全息测试模型,分析了一维声传播测点测量参数对重构误差的影响。第4章对力源识别匹配场处理方法理论进行了研究,并建立了相应的振速拷贝场及声压拷贝场物理模型,针对力源识别匹配处理问题,对不同激励力形式下的壳体声振特性进行分析,建立了水下结构力源等效方法。第5章对力源识别中的逆问题——匹配搜索算法进行了理论研究,采用粒子群遗传融合算法对结构力源信息进行匹配搜索,以水下单层圆柱壳体作为基本结构,采用有限元与边界元相结合的方法,建立振速与声压传递函数拷贝场,分别对这两种拷贝场情况下的搜索算法阈值条件进行分析。第6章在消声水池中进行水下结构力源识别匹配场处理方法的验证试验。

本书是关于水下弹性结构噪声源识别方法的一部专著,可供水下目标特征,噪

声测量、计量等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所水声工程专业高年级本科生、研究生的教材或参考书。书中内容力求精简,试验数据资料力求充实,便于读者理解本书的基本观点。希望本书能对读者的工作和学习有所裨益。

本书由哈尔滨工程大学肖妍、商德江共同编写,其中商德江教授编写第1章,并对全书统稿;肖妍讲师编写第2章至第6章。

张超、刘永伟、唐锐、尚大晶、芦雪松、王曼等人为本书的审稿工作付出了辛勤的劳动,在此深表感谢。

本书的编写与出版工作得到了国家自然科学基金项目“水下结构噪声源识别匹配场处理技术研究”(编号11274080)及国家自然科学基金“一维声传播方程约束条件下双平面近场声全息测量方法研究”(编号11474074)的资助,在此特表感谢。

限于作者水平和经验,本书的不足之处敬请读者指正。

著 者

2016年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 噪声源识别技术发展现状	2
第 2 章 水下弹性结构表面源强度声全息重构方法	10
2.1 理想流体中的声传播方程	10
2.2 近场声全息变换技术基本原理	12
2.3 表面奇异积分方程处理方法	25
2.4 本章小结	33
第 3 章 水下结构表面源强度声全息重构精度分析	35
3.1 边界元法近场声全息重构精度分析	35
3.2 半空间环境下的边界元法近场声全息变换	52
3.3 全息重建过程中的正则化处理方法	58
3.4 半空间环境下近场声全息变换方法试验验证	60
3.5 本章小结	64
第 4 章 水下弹性结构力源识别匹配场处理方法	65
4.1 力源识别匹配场处理方法	65
4.2 水下单层圆柱壳体振动及声辐射特性	68
4.3 水下圆柱壳体结构广义拷贝场计算方法	87
4.4 本章小结	90
第 5 章 水下弹性结构力源识别匹配搜索精度分析	91
5.1 目标函数全局寻优搜索算法	91
5.2 力源识别匹配搜索算法阈值条件	96
5.3 力源识别匹配搜索算法精度分析	105
5.4 本章小结	131
第 6 章 水下结构噪声源识别匹配场处理方法试验研究	132
6.1 试验模型及试验系统	132

6.2 单点力源激励	135
6.3 两个力源共同激励	138
6.4 本章小结	144
参考文献	145

第1章 绪 论

1.1 引 言

水下航行器的生存能力和战斗力在很大程度上取决于其自身的声隐蔽性及声探测能力,而其声隐身性能又与其噪声水平直接相关,所以对水下航行器进行减振降噪处理无疑是提高其声隐蔽性的最有效方法。降低其辐射噪声不仅可以减小被敌军声呐设备探测的概率,还可以提高自身的声探测能力。为保证可以采取正确的水下航行器减振降噪措施,必须要从其噪声源位置、各噪声源对辐射噪声、自噪声的贡献程度及能量传播途径等方面进行分析判断,即对噪声源进行识别^[1-3]。噪声源识别结果还可用于水下航行器的声学结构设计以及辐射噪声在线预报。此外,当机器设备发生故障时,由于声信号特征的改变,噪声源识别结果将与正常状态不同,即可以利用这个特性进行机器设备的故障诊断等工作^[4,5]。因此,在水声领域,噪声源的识别与定位一直是一个热点问题。为提高水下航行器的声隐身性能,全面并深入地开展噪声源识别方法研究,对其主要噪声源进行定量分析是非常有必要的^[6,7]。

针对水下弹性结构的噪声源进行分析,主要包括表面源强度、结构内部的实际激励力源两个方面。有关表面源强度分析的方法有很多,其中近场声全息(Near-field acoustic holography, NAH)测试技术只需要近场处的全息声压,即可得到源表面声学量信息以及空间声场中的声能分布、辐射声功率等重要参数^[8,9],对水下结构的噪声源识别及噪声控制方案设计提供了可视化的有效信息。在近场声全息测量实施过程中,为了便于工程实施,常采用双平面进行测量,并利用边界元法声全息技术进行非共形声场变换,以此来获取声源表面的声学量信息。但由于试验测量全息面尺寸有限,必然引入截断误差问题,增大测量面的处理方法也只能尽量减小声场截断误差,而且针对大型尺寸的结构,过大的测量面也难以实现。因此,提高全息变换算法的可靠性和声场重构精度,是目前边界元法声全息变换技术急需解决的问题。

对水下结构进行减振降噪处理时,必须结合结构内部力源对辐射噪声的贡献量进行分析,方能有效地对其内部噪声源进行治理。现有的结构力源识别大多依赖于力源振动信号监测及传递路径的测试,但结构本身的声振特性让单独力源的振动信号难以准确测量。为改变过度依赖于振源信号的现状,有效地识别结构力

源,寻找一种新的力源识别方法是非常有必要的。将水声匹配场处理(Matched field processing, MFP)的概念^[10,11]应用于水下结构内部力源识别中,可以避免力源识别方法中难以克服的振源信号获取问题,并且利用了弹性结构的声辐射特性。这种方法具有良好的发展前景。

1.2 噪声源识别技术发展现状

噪声源识别技术经过多年发展,形成了许多基本的噪声源识别方法,如时历分析和谱分析、相关分析与相干分析等^[12~15]。

时历分析法主要针对具有冲击性的噪声源,建立其与声场的对应关系。这种方法原理简单,但对测量要求很高,且应用范围有限。辐射效率测定法则主要是利用各噪声源辐射效率计算结果来识别各噪声源,需要获得各激励源单独工作时的源面振速及辐射声功率,若不能满足各源单独启动,其计算结果也不准确。

谱分析方法的基本思想是分别对声源和声场进行频谱分析,并通过相应的谱线对噪声的来源进行识别。谱分析方法原理简单且容易实现,但在频谱分析的过程中,某些源可能会出现相同的谱线,所以无法通过谱线来判断噪声的具体来源。

相关分析法和相干分析法的本质是相同的,都是利用各个噪声源与声场之间的关联强弱来进行判断的,并且相关性强的声场贡献量较大。其区别就是相关分析法应用于时域分析,而相干分析法应用于频域分析。当各个噪声源之间的相关性较强时,两种方法对于源的识别会出现一定偏差。

鉴于以上各方法的优势与不足,国内外学者对噪声源的识别技术进行了大量的研究工作,在传统噪声源识别方法的基础上发展了多种噪声源识别方法,如多输入/输出模型分析法、振动和声场相关分析法、近场声强测量方法以及近场声全息法等。

Maynard 和 Williams 等人^[8,9]针对共形正交面情况,于1985年首次提出了近场声全息测试技术。这种方法通过空间声场变换对源面的声学量进行重构,实现了噪声源识别,同时获得了辐射声场的空间指向性。国内外学者对其开展了大量理论与试验研究,形成了多种全息测试方法。由于近场声全息测试技术在理论上存在着声场截断误差、特征频率处解的非唯一性和奇异积分等引起的源面声学量重构精度较差等问题,提高重构精度一直是全息技术发展的重要方向。20世纪90年代初,由于单点或孤立的多点数据的功率谱分析无法估计源之间相关性等信息,Chakravorty^[2]提出了基于多输入/输出模型的潜器噪声源分析方法。1996年,蒋国建^[16]等提出了自适应噪声抵消方法,并将该方法用来判断不同工况下艇舷声呐部

位主要自噪声的来源,取得了比较满意的效果。杨德森教授^[17]提出了把条件功率谱分析与偏相干分析相结合的噪声源分析方法,并在小型鱼雷主要噪声源分析中采用了这一方法,取得了较好的效果。继 Herault 和 Jutten 于 1991 年首次提出基于反馈神经网络的盲分离方法后,Brionle F 等^[18]在 1997 年欧洲水下防务会议上进行了盲源分离技术在浅海环境水声信号中的应用研究,认为可以将盲分离技术作为一种信号分类的预处理手段,并将其应用于水下结构降噪方面。2000 年, Peter WT Yuen^[19]采用独立分量分析框架,提高了大背景噪声环境下的微弱信号检测效率。

作为信号处理领域研究热点,盲信号分离技术主要应用于机械故障诊断领域,近年来其应用领域呈现出了不断扩大的趋势。2009 年,江涌^[20]等将盲分离方法应用到了双层柱壳结构的激励源量化识别中,并在水池中进行了验证试验。2010 年,成玮等^[21]结合盲分离方法与系统先验信息理论,提出了激励源贡献量定量分析方法,并应用其进行了某型号潜器缩比模型激励源贡献比例量化分析。

针对结构噪声源传递路径方面,Cho YongMan^[22]于 1997 年提出了一种基于状态空间的系统辨识方法,并利用涡旋式压缩机进行了试验验证。2012 年,张磊等^[23]进行了水下圆柱壳体结构噪声的工况传递路径分析,以实现水下航行器噪声源和噪声传递路径的识别、量化,建立了水下结构的 OPA 模型,实现了噪声与结构振动数据的同时基采集。2013 年,徐猛等^[24]介绍了传递路径分析的具体步骤,采用测试得到的传递函数,对关键转速下各路径对车内噪声的贡献量进行了分析。同年,肖斌^[25]提出了非线性系统噪声源分析策略,进行了舰船壳体结构噪声分离技术研究。

声强测量技术抗干扰能力强,在机械声源识别与传递途径分析中得以广泛应用。但是采用声强测量技术,原则上要求测量结构的完整包络面,所以对于大型的水下结构,只能通过多个传感器组成声强测量接收阵,实现大面积的声强扫描。国内著名学者何祚镛教授^[26,27]从 1993 年就开始进行声强测量试验研究,先后在松花湖、旅顺等地针对系泊状态的实船进行了水下声强测量,并对实船上多台机械设备的声振特性进行了综合分析,提出了频带内辐射声功率比例比较法,对声辐射主要激振源进行识别。声强测量技术可以实现水下结构噪声源的有效识别,但是试验所需经费较高,在一定程度上也限制了其研究进展。

以上所述的这些方法,根据其主要的研究对象,可以大致分为表面源强度识别与力源识别两种。表面源强度识别方法以声场测量为主,最具代表性的就是近场声全息及声强测试技术,而近场声全息技术的应用更为广泛。但是到目前为止,其重构精度仍然有待提高。力源识别方法都需要对振源的振动信号进行测试,并以传递路径分析为主,而实际上结构内部的振源信号难以准确测试,应用受到很大限制,急需开展新技术研究。

1.2.1 全息技术的发展现状

早在 20 世纪 80 年代初,近场声全息技术已经被引入声源或振动体辐射场的测量与分析、噪声源识别定位及结构表面源强度评价等领域,成为当前声学领域的一大研究热点。近场声全息技术的基本思想是对声源近场域内的复声压信息进行测量,并将测量得到的复声压信息按照声场变换算法进行重构,进而实现整个三维辐射声场中的声压、质点振速、声强和辐射声功率等声学量的预测,从而进行噪声源精确定位以及整个声场的可视化^[28-30]。近场声全息技术的实现过程主要分为复声压的测量和声场的空间变换两个部分。声场的空间变换主要可以分为正交共形结构的近场声全息变换技术和非共形结构的近场声全息变换技术两种。

1. 正交共形结构的近场声全息变换技术及其应用

20 世纪 80 年代初期,J. D. Maynard 和 E. G. Williams 等人将二维快速傅里叶变换技术引入到亥姆霍兹方程中,实现了全息面到源面间声压、振速等声学量的空间变换。在随后的几年时间里,Maynard, Williams 和 Lee 等人根据球面波和柱面波理论,成功地将平面 NAH 技术推广到了柱坐标系和球坐标系下,并通过数值仿真验证了不同坐标系下空间声场变换的有效性。1989 年起,哈尔滨工程大学何祚镛教授带领的团队将近场声全息测试技术引入至水下结构噪声源识别领域^[31-37],合肥工业大学、中国科学院武汉物理所、上海交通大学等多家单位也针对正交共形声全息相继开展了相关研究工作,取得了很多进展与成果^[38-42],为国内近场声全息技术的发展奠定了良好的理论及试验基础。1996 年,张德俊等人^[43]针对影响空气声学中 NAH 实验系统成像质量的各种参数优化设计方案开展了详细研究,对多种典型振动体进行测量实验,获得了良好结果。1998 年,蒋伟康等人^[44]开发了声近场综合试验解析技术,实验结果及车外噪声分析结果取得了良好效果。2000 年,何元安等人基于柱面声场变换,对远场指向性快速计算方法进行了改进,并对声基阵各个阵元的指向性参数进行了试验测试。2004 年,陈晓东^[45]针对近场平面声全息变换中的测量和重构误差进行了深入详细的分析,为平面声全息测试提供了许多理论依据以及有利的数据支撑。2005 年, Jacobsen 等人^[46,47]比较了以声压和质点振速为输入信息时基于傅里叶变换算法的全息重建效果,指出利用质点振速测量结果进行重建时,误差敏感性更小,可以极大地改善源面振速重建效果。2007 年,张永斌、毕传兴等人^[48]也进行了基于质点振速的近场声全息重建方法研究,指出利用质点振速进行重构时,边缘重建精度较高,可以采用较小的全息面来获得与基于辐射声压的全息重建精度。2008 年,胡博、杨德森等^[49,50]对基于声矢量测量的近场声全息重构方法进行了深入研究。

基于快速傅里叶变换的正交共形近场声全息测试技术,其突出优势在于实现

过程简单,可以利用傅里叶变换进行快速计算。但它对全息面和声源面几何形状以及网格节点的分布均有限制,在一定程度上制约了算法的应用范围。

2. 非共形结构的近场声全息变换技术及其应用

在20世纪80年代末期,Veronesip和Maynard等人^[30]提出了基于边界积分法的任意形状声源表面声场重建的NAH技术。该技术突出特点在于对源面和全息面的形状没有任何限制,具有更加广泛的应用范围。边界元法近场声全息技术主要是将亥姆霍兹积分方程转变为小单元积分求和的形式,根据源面声压与法向振速之间的变换关系和源面法向振速与场点声压之间的变换关系建立变换矩阵,最后通过解方程组解算得到声源表面上声压和法向振速,进而实现源表面声场的重建。20世纪90年代初期,Bai等人^[51]对边界元法近场声全息技术进行了改进,采用了奇异值分解(SVD)求逆过程,等同于在基于空间声场变换的NAH技术中引入低通滤波器,很大程度上改善了声场重建结果。同时,A. Sarkissan等人^[52]将边界元法声全息技术应用于振动圆柱体的局部测量。研究结果表明,该算法具有很好的实用性。

在边界元法声全息变换过程中,边界积分的奇异性和传递矩阵的病态性可能会对重构结果的精度造成一定的影响,而控制传递矩阵病态性影响的有效方式是正则化方法。1996年,Kim和Ih等人^[53]利用Tikhonov正则化方法处理内部NAH问题,抑制了传递矩阵的SVD中对于声场重构作用不大又对误差非常敏感的各项参数的影响,从而提高声场的重建精度。经过障板辐射体实验验证,该正则化处理方法可以将重建误差减小约40%。2001年,Williams等人^[54]进一步验证了正则化方法在边界元法声全息技术中的可行性,并且给出了正则化方法中相关参数的选择方法。2012年,胡宗军^[55]等系统地研究了边界元法中高阶单元奇异积分问题,并将半解析正则化算法应用于三维声场边界元分析中的奇异积分求解问题。

另一种常用的非共形全息变换技术则是Helmholtz最小二乘法近场声全息。20世纪80年后,Chao等人针对声场逆变换问题进行了详细的研究,提出了基于正交函数适配的最小平方误差分析方法^[56],相对于BEM方法,这种方法的突出优势在于明显地减少了计算量,同时对于声源的形状也没有具体的限制。1997年,Wu^[57]等人对上述方法进行了改进,提出了Helmholtz方程最小二乘法近场声全息技术。该算法选取球函数作为基本函数,利用空间点上的声压来匹配球面波函数的待定系数,实现了源面声压重建,同时进行了声源外部的辐射声场分析。随后,Wu等人对保龄球的声辐射特性进行了测试,并采用Helmholtz方程最小二乘法进行了分析,得出了共形面测量时的HELS法重建精度较高的结论。2004年,Wu等人在考虑全息面上向外辐射声波的同时,考虑了向内辐射的声波,并在重建求逆矩

阵的过程中,引入了改进的 Tikhonov 正则化法,提高了重建声场的精度^[58,59]。基于 HELS 的声全息技术克服了 BEM 方法中边界处的奇异积分问题,计算量也相对较少。但是在使用该方法处理长宽高比例较大物体的声辐射问题时,会出现收敛速度慢和重建精度较低的问题。因此,基于 HELS 的声全息技术在具体的工程应用范围上存在着一定的限制。

由于边界元法近场声全息测试技术具有对结构的通用性,持续受到国内外的关注。历经多年发展,人们已在传统近场声全息技术的基础上开发了多种形式的全息测试技术^[60~63],如基于波叠加方法(WSA)的 NAH 技术、局部近场声全息(Patch NAH)技术等,已经在很多领域实现了应用测试,国内也已形成一些固定的测试平台,并开发出了可实际应用于水下大型目标或空气中目标的对于飞机、汽车的噪声源识别和降噪效果评估的测量系统。然而受限于获取声场信息的有限性、奇异积分处理方法和用于数值计算的硬件系统等方面的问题,近场声全息测试技术精度问题已经近乎为目前全息发展的瓶颈。因此,寻求一些新方法来提高全息重建精度是具有重要意义的,如果可以利用已经建成的测试平台实现高精度源面声学量全息重构,则更具应用价值。

1.2.2 力源识别技术的发展现状

针对结构内部力源的分离与识别,国内外众多学者开展了大量的理论与试验工作,形成了多种方法,有时域平均法、频谱分析法、相关分析方法以及与其相对应的频域上的相干分析方法、小波分析方法等。

1. 时域平均方法

1986 年,西安交通大学的何正嘉等人^[64]系统地研究了时域平均方法的数学原理,并将该方法用于分离和识别机床低频杂音的研究中,取得了很好的效果。2005 年,中北大学的余红英等人^[65]将时域平均技术引入到齿轮振动信号分解理论中,对车辆齿轮箱的状态进行监测。研究表明,时域平均技术可以从总的振动信号中分离出各个齿轮的振动信号,从而能有效地检测齿轮的各类故障。2009 年,重庆大学的邵毅敏等人^[66]将时域平均技术进行了一定程度的改进,提出了变周期信号的时域平均算法,并将其应用于汽车齿轮箱故障检测中,减小了相位误差累积效应的影响,同时提高了信噪比。

2. 相关分析方法

2005 年,西安交通大学的丁康等人^[67]利用循环自相关分析方法对齿轮变速箱实测信号进行了解调分析,并取得了很好的效果。2009 年,南京航空航天大学的左泽敏等人^[68]系统地研究了相关分析方法振源和噪声源识别中的应用,并指出了

相关分析方法在振动信号处理中应用的发展趋势。2010年,天津大学的王伟魁等人^[69]提出了一种基于相关分析的声发射罐底检测降噪方法。他们通过对中国石油天然气公司储罐的声发射检测数据进行处理,验证了该方法具有一定的抗干扰能力,评估结果正确率有所提高。

3. 频谱分析方法

1994年,华南理工大学的邵汝椿等人^[70]根据频谱分析方法得到振动信号的频谱特征,并与机床传动系统及主轴箱结构参数关系进行对比,进而快速、准确地对振元进行识别。2009年,Mohammad H. F. 等人^[71]利用改进的频谱分析方法对车辆的振源以及噪声源的分离和识别进行了深入的研究,仿真分析和实验结果表明了该算法的有效性。2010年,西安交通大学的成玮等人^[72]提出了利用频谱相关技术分析潜器结构振动信号的传递特征,并采用某型潜器的缩比模型,搭建了模拟实际航行状态下的舱壁振动试验平台,进行了振动信号传递特性的实例分析。

4. 相干分析方法

2006年,南京航空航天大学的陈茉莉等人^[73]提出一种基于相干函数分析的振动信号源识别方法。该方法首先判断信号源在整个频段上独立的个数,进而对独立和非独立信号源分别进行处理。仿真结果表明,该方法对信号源的识别达到了令人满意的效果。2010年,中北大学的刘晓娟等人^[74]详细研究了利用相干分析法识别噪声源的方法,并且成功地实现了对车体乘员舱处噪声源的分析与识别,为车体减振降噪技术提供了一定的理论依据。2011年,中国空气动力研究所的顾光武等人^[75]对相干分析技术进行了改进,系统地推导了偏相干函数的条件谱计算公式,并将该方法用于航空声学风洞的主要噪声源识别中,取得了很好的效果。

5. 小波分析方法

2001年,东南大学的杨国安等人^[76]利用小波分析方法对机械故障信号进行分解与重构,并且以油田钻井往复泵为实例,验证了该方法对于机械故障诊断的有效性。2002年,西安交通大学的何正嘉等人^[77]详细地研究了小波技术,并且对小波技术在机械监测诊断领域的应用现状与进展进行了概括和总结,为小波技术的具体应用提供了一定的理论依据。2009年,吉林大学的陈书明等人^[78]根据小波分析理论对噪声及振动信号进行分解,进而得到各个信号的特征向量,并通过信号的特征向量确定了车内噪声与其他振动、噪声信号的相关系数。

由以上叙述可知,现有的结构力源识别大多依赖于力源振动信号监测及传递路径的测试,但由于结构本身声辐射特性,单独力源的振动信号难以准确测量,为有效识别结构力源,借鉴广泛应用于水下目标定位的匹配场处理技术的基本思想^[79,80],建立水下弹性结构力源识别匹配分析方法。这种方法将建立力源至辐射声场的传递函数拷贝场,以测量声压作为输入,对力源的最优化状态进行匹配搜

索,从而实现力源识别及贡献量排序。

1.2.3 匹配搜索算法的发展现状

作为匹配场处理技术中的重要内容之一,匹配搜索算法一直以来都是人们关注的焦点问题。传统的搜索方法分类以及其特点如图 1.1 所示。

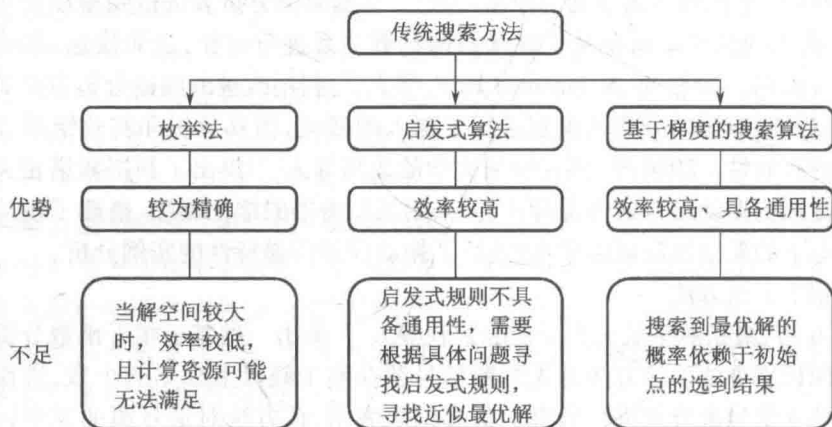


图 1.1 传统搜索算法分类

自 20 世纪 70 年代开始,人们在传统搜索算法的基础上,发展了很多新的优化算法^[81~85]。例如,受生物神经网络功能启发而产生的人工神经网络;由自然界中固态物质的退火过程衍生的模拟退火算法;模拟自然选择和遗传学机理的遗传算法。

模拟退火算法最早是由 MetroPolis 在 1953 年提出的, Kirkpatrick 等人在 1983 年将其引入到了优化算法当中。这种方法是一种通用的随机寻优算法,其原理主要是借鉴了固态物质的退火过程,即从一个初始值出发,按照一定的退火策略改变状态值,当找到全局最优解后,再概率性地跳出优化过程。从理论上讲,这种算法是一种通用的优化算法,并具有全局优化性能。经过多年发展,模拟退火算法被不断的改进,形成了诸如快速模拟退火^[86]、适应性模拟退火^[87]等方法。

遗传算法借鉴了生物学中的遗传、基因突变以及自然选择等现象,整体搜索策略和优化搜索方法原理十分简单。同模拟退火相同,在优化过程中首先要进行解空间的随机初始化,选择一个目标函数,并在每一代中,计算每一代的适应度,经过不断的自然选择和不断的变异,最终实现极值优化搜索。遗传算法具有很强的通用型,所以广泛应用于许多科学领域。



此外,还有借鉴了动物群社会行为,形成了例如蚁群算法以及粒子群算法的群智能优化算法。粒子群优化算法也可以称为微粒群优化算法,是受鸟群在觅食过程中产生的移动及聚集行为的启示而发展起来的群体智能优化算法;粒子群算法原理简单并且容易实现,目前已经被广泛应用于目标函数优化、神经网络训练、动态环境优化等许多领域。传统的粒子群优化算法在早期收敛速度较快,但是由于没有交叉和变异等遗传操作,使得算法在后期阶段可能会陷入局部极值,难以跳出局部优点。

由这些算法各自的优势,形成了多种融合算法:粒子群模拟退火、遗传模拟退火以及粒子群遗传融合算法等^[88~90],每种算法的提出都与其特定应用范围密切相关。结合结构力源识别匹配场处理过程中所对应的搜索问题,本书以粒子群遗传融合方法为例,进行了水下结构力源识别匹配搜索的相关原理介绍。

第2章 水下弹性结构表面源 强度声全息重构方法

水下弹性结构噪声源识别方法中,近场声全息技术对表面源强度识别十分有效。近场声全息分为正交共形变换和非共形变换两种形式,但在实际应用中,正交共形的测量面往往难以实现。所以相比之下,非共形全息变换的应用更为广泛。本章对共形平面、共形柱面全息变换技术及边界元法非共形近场声全息变换技术的基本原理分别进行了介绍,并针对边界元法近场声全息变换方法中表面奇异积分问题,提出了施加一维声传播方程约束条件的处理方法,降低了积分方程的奇异性,提高了源面声压及振速的重构精度。

2.1 理想流体中的声传播方程

声能在结构体中通过振动的方式进行传递。因此,声场的基本特性决定于边界条件。即使声源不同,当声波离开结构体在流体中进行传播时,声传播特性也具有相同的规律。

2.1.1 流体介质基本方程

以流体介质的运动规律为出发点,进行以下几点必要的理想情况假设^[91]:

- (1) 流体介质是理想的,声波在传播过程中没有能量损耗;
- (2) 介质是静止且连续均匀的;
- (3) 声波在介质中的传播过程是绝热的;
- (4) 声场中各声学参数都属于一阶小量,声波为小振幅波。

在连续介质中,声压、密度和质点速度是位置与时间的函数,分别采用 $p(x, y, z, t)$, $\rho(x, y, z, t)$ 和 $u(x, y, z, t)$ 表示。在上述理想情况的假设条件下,流体介质中的声场满足以下三个基本方程。

- (1) 连续性方程(质量守恒)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho_0 u) = 0 \quad (2-1)$$

式中, ∇ 为梯度算子。