

水中目标前向散射声场 特征及其应用

雷 波 著



科学出版社

水中目标前向散射声场 特征及其应用

雷 波 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以比较简明的方式向读者介绍水中物体前向声散射所涉及的基本理论、规律以及一些有实际应用价值的成果。全书共 8 章, 主要讲述了自由空间中典型目标体前向散射声场特征、信道中目标穿越收发连线时前向散射引起的声场幅度和相位等的异常变化特征和规律, 并针对直达波对前向散射波的强干扰, 重点阐述了基于信道响应规律和直达波抑制原理的前向散射特征检测方法, 进一步介绍了前向散射声场特征在目标距离估计中的初步应用和小目标体的散射声场特征及对其时反聚焦的影响。本书主要以作者所在课题组多年来对水中目标前向散射的研究成果为主, 同时包含国内外研究成果。

本书是专门针对水中目标前向声散射物理问题的著作, 注重理论与实验相结合, 可供海洋科学、水声工程、声呐技术等领域的教学与科研工作人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水中目标前向散射声场特征及其应用/雷波著. —北京: 科学出版社, 2018.6
ISBN 978-7-03-057982-9

I. ①水… II. ①雷… III. ①水下目标-水声散射-研究 IV. ①O427.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 127950 号

责任编辑: 祝 洁 张瑞涛/责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟/封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 297 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

物体的前向散射是波传播过程中的一种自然现象。在光学和电磁学领域中,关于前向散射现象的研究已取得了大量的基础成果,而且已有所应用。对于水中物体而言,声波是否也存在着类似的现象和规律,人们对此尚未有深入的理解和掌握。尽管在 20 世纪 80 年代开始就有水中目标前向声散射的相关研究工作,但并未引起水声科研人员对水声目标前向散射现象的重视。直至 20 世纪末期,潜艇降噪和吸波技术得到了迅速的发展,使得水中隐身目标的探测变得越来越困难,水声探测的紧迫现状使得水声科研人员重新去认识水声目标散射声场的精细特征。

正是这些迫切需要推动了前向散射声场特征这一研究方向的发展。一些基于前向散射特征探测的新概念、新原理呼之欲出。近年来,以美国麻省理工学院海洋物理实验室、俄罗斯科学院应用物理研究所为代表的水声研究团队也积极投身到这一方向的研究中。

本书介绍的研究内容得到了两项国家自然科学基金(61571366, 61101192)以及博士后科学基金等的资助。本书试图以比较简明的方式,向读者介绍水中物体前向声散射所涉及的基本理论、规律以及一些有实际应用价值的成果,内容以作者所在课题组的多年科研积累为主,同时还介绍了国外前向散射研究取得的代表性成果。

全书共 8 章内容。第 1 章阐述了前向声散射的内涵,总结了与水中目标前向声散射密切相关的研究现状,如自由空间和水声信道目标前向声散射建模理论、声散射特征提取方法等。第 2 章在基本散射理论模型基础上介绍了自由空间中典型物体的前向散射特征,分析了表面吸声材料对散射波的影响机理,给出了前向目标强度的实验室测量方法和结果。第 3 章在对国内外文献总结的基础上,将声传播理论与散射理论相结合,论述了目前水声信道中目标声散射建模的波数积分-散射函数耦合模型、简正波-散射函数耦合模型和波数积分-虚源耦合模型等三种经典方法的基本原理和典型仿真计算结果。第 4 章基于声场模型分析了前向散射能量分布规律,比较详尽地阐述了水中运动目标穿越收发连线时前向声散射引起的声场扰动机理,揭示了简正波模态耦合、声场垂直到达结构等声场特征,通过实验详细分析了在不同深度上前向散射引起的声场异常与物体位置的内在规律。第 5 章针对前向散射在直达波干扰下引起的接收能量变化微弱问题,通过与水中声场响应特征相结合,介绍了基于时域累积的前向散射声场包络变化特征检测方法和不同方向上声场相位突变特征的检测方法等,并采用垂直阵列声场处理,阐述了双波

束形成技术提取方法和时反散焦处理的基本原理。第 6 章针对前向散射的直达波强干扰抑制问题,结合湖上实验,详细阐述了基于空域滤波与主分量分析的联合处理方法和基于自适应相消原理的直达波抑制方法,并给出了直达波的抑制结果,介绍了双基地处理的一般方法,如匹配场空域抑制方法和脉冲压缩低旁瓣处理等。前向散射声场中包含着目标的位置信息,第 7 章基于前向散射信号传输时延特征,探讨了前向散射声场特征在目标距离估计中的初步应用问题,阐述了基于扰动声场时间差和基于目标信号相对时延的定位方法,介绍了基于变异声线交叉的定位方法。对于水中中小目标体,也存在着类似的声散射现象,第 8 章基于波数积分-散射函数耦合模型和虚源耦合模型,进一步分析讨论了掩埋小目标散射声场特征和信道小目标的前向声散射对时反聚焦的影响。

作者深切感谢马远良院士对本书相关研究的指导与帮助;西北工业大学航海学院的杨益新教授、杨坤德教授对本书的相关研究和撰写也提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢;同时感谢何传林博士对本书 2.5 节、4.3 节和 6.4 节的撰写给予的大力支持。

限于作者的水平,书中的不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 前向散射的含义	1
1.2 自由空间目标声散射模型	2
1.3 水声信道中目标的前向散射模型	5
1.4 目标前向散射声场特征的检测方法	7
1.5 本书结构	9
参考文献	11
第 2 章 自由空间典型目标体前向声散射模型及其特征	16
2.1 球体的前向散射声场	16
2.1.1 球体散射场基本理论	17
2.1.2 球体的前向散射声场特征分析	19
2.2 球壳体的前向散射声场	22
2.2.1 球壳声散射的基本理论	22
2.2.2 前向散射声场特征分析	24
2.3 椭球体的散射函数	26
2.3.1 等效柱方法的基本理论	26
2.3.2 有限长圆柱壳的散射模型	28
2.4 复杂目标远场声散射模型	31
2.4.1 虚拟球面声散射原理	31
2.4.2 球谐波展开模型	33
2.4.3 球心位置对计算结果的影响	34
2.4.4 Benchmark 模型计算结果	36
2.5 材料性能对球体散射声场的影响	38
2.5.1 黏弹性层的散射模型	38
2.5.2 黏弹性层中的波动方程	39
2.5.3 数值算例	40
2.5.4 机理解释	41
2.6 前向散射目标强度测量方法	42
2.6.1 前向目标强度测量原理	42

2.6.2 测量结果	44
2.7 本章小结	48
参考文献	49
第 3 章 水声信道目标前向声散射的经典模型	51
3.1 波数积分-散射函数耦合模型	51
3.1.1 模型原理概述	52
3.1.2 快速场算法	54
3.1.3 球体目标的前向散射现象	56
3.2 简正波-散射函数耦合模型	58
3.2.1 基本原理	58
3.2.2 前向散射声呐方程近似计算	60
3.2.3 前向散射声场仿真	62
3.3 波数积分-虚源耦合模型	64
3.3.1 基本原理	64
3.3.2 波数积分-虚源耦合模型特点	66
3.3.3 虚源数量对计算结果影响分析	67
3.3.4 虚源分布形式对散射场计算结果的影响	69
3.4 本章小结	71
参考文献	72
第 4 章 水声信道目标前向散射声场特征	74
4.1 前向散射声场到达能量分布	74
4.1.1 前向散射探测区域	75
4.1.2 前向散射频移特征	79
4.2 前向散射引起的声场模态变化	82
4.2.1 Pekeris 波导中的模态耦合	83
4.2.2 典型浅海环境中模态耦合	83
4.3 前向散射声场的垂直到达结构	85
4.3.1 直达波的角度到达结构	86
4.3.2 前向散射波的角度到达结构	90
4.3.3 接收信号的角度到达结构	95
4.4 目标前向散射声场扰动理论	97
4.4.1 声场扰动波动理论	97
4.4.2 运动目标的声场干涉理论	99
4.5 前向散射声场扰动随深度变化规律	100
4.5.1 实验测量方法	100

4.5.2 不同信号的前向散射声场扰动	101
4.5.3 前向散射声场扰动随深度变化规律	104
4.6 前向散射声场扰动随目标距离变化规律	105
4.6.1 理论分析方法	105
4.6.2 实验测量方法	106
4.6.3 声场扰动特征	107
4.6.4 前向散射声场异常规律	109
4.7 本章小结	110
参考文献	110
第 5 章 基于水声信道响应的前向散射声场特征检测方法	113
5.1 目标前向散射包络特征检测方法	114
5.1.1 信号包络检测方法原理	114
5.1.2 海浪对接收信号包络的影响	117
5.1.3 包络检测实验结果	119
5.2 前向散射相位特征检测方法	120
5.2.1 相位突变检测基本原理	120
5.2.2 相位突变实验结果	121
5.3 声波到达结构异常特征检测方法	122
5.3.1 声波到达结构垂直阵提取方法	122
5.3.2 声波到达结构特征	123
5.3.3 声速剖面变化对声波到达结构的影响	126
5.4 声场强度变化的虚拟时反检测方法	127
5.4.1 时间反转镜检测基本原理	127
5.4.2 时反散焦数值仿真	129
5.4.3 实验及虚拟时反处理方法	131
5.4.4 时间反转声场异常特征提取结果	133
5.5 本章小结	135
参考文献	135
第 6 章 基于直达波抑制的前向散射特征检测方法	138
6.1 前向散射声场的主分量分析方法	138
6.1.1 空域声场响应特征分解方法原理	139
6.1.2 声场响应异常实验方法	141
6.1.3 声场响应测量结果	143
6.1.4 不同深度特征提取仿真	146
6.2 基于匹配场处理的直达波抑制方法	147

6.2.1	匹配场抑制原理	147
6.2.2	直达波抑制仿真	149
6.3	基于自适应相消原理的增强方法	151
6.3.1	自适应相消基本原理	151
6.3.2	湖上实验分析	152
6.3.3	前向散射声场增强特征	155
6.4	基于模糊表面空间置零原理的增强方法	158
6.4.1	前向散射波和直达波的宽带表征形式	158
6.4.2	模糊表面空间置零抑制原理	159
6.4.3	数值仿真	161
6.5	低旁瓣脉冲压缩滤波器设计方法	165
6.5.1	旁瓣抑制表述	165
6.5.2	最佳累积旁瓣抑制滤波器	166
6.5.3	最佳峰值旁瓣抑制滤波器	168
6.5.4	仿真结果	168
6.5.5	性能分析及讨论	170
6.6	本章小结	171
	参考文献	172
第 7 章	前向散射声场特征在目标距离估计中的应用	175
7.1	基于前向散射扰动特征的目标距离估计	175
7.1.1	前向散射距离估计原理	175
7.1.2	前向散射距离估计结果	177
7.2	基于目标信号相对时延的定位方法	180
7.2.1	干扰背景下定位原理	180
7.2.2	实验数据处理结果	183
7.2.3	移动干扰声源讨论	186
7.3	基于前向散射信号时延特征的目标跟踪方法	188
7.3.1	跟踪算法原理	188
7.3.2	水池实验跟踪结果	192
7.3.3	基于时延特征的目标距离估计基本原理	193
7.4	基于变异声线提取的目标定位方法	195
7.4.1	基本原理	195
7.4.2	数据处理结果	196
7.5	本章小结	198

参考文献	199
第 8 章 散射模型在小目标声散射分析中的应用	201
8.1 近海底目标声散射研究进展	201
8.2 掩埋球体声散射特征	203
8.2.1 计算条件	203
8.2.2 散射声场特征	203
8.3 掩埋物体的目标强度	205
8.3.1 球壳的散射声场	205
8.3.2 等效目标强度定义	207
8.3.3 等效目标强度和信混比	209
8.4 信道中的目标散射声场特征	212
8.4.1 Pekeris 波导中的平面波表征	212
8.4.2 平面波作用下的声散射	214
8.4.3 点源作用下的声散射	216
8.4.4 物体对声场的扰动	217
8.4.5 近距离时反散焦声场分析	219
8.5 本章小结	221
参考文献	222

第1章 概述

1.1 前向散射的含义

在电磁和天文领域中,前向散射是指相对于声源位于物体的另一侧,且比入射波波长尺度大,而比入射波照射面尺度小的物体引起的波场衍射、非均匀折射或者非镜像方向上的反射,导致波场相位发生 90° 以上偏转的现象。已经证明,在高频情况下,前向散射几乎不受目标吸波能力的影响。实际上,前向散射可理解为在目标体前向方向上对波场的一种扰动。当整个波场消失时(即产生阴影),散射场与入射场场强相等,相位相反。在产生前向散射的情况下,按照光学中的巴比涅原理(Babinet's principle)(Guenther, 2005; Jiménez et al., 2001),即在高频情况下,不透光目标体与同等侧影形状的“洞”形成的前向散射相同。基于此原理,可对目标前向散射强度进行估计。在电磁场中前向散射具有目标强度大、几乎不受吸波能力影响等一系列优势,这推动了前向散射雷达的发展 (Abdullah et al., 2007; Cherniakov et al., 2005; Gould et al., 2002; Blyakhman et al., 1999)。

尽管从 20 世纪 80 年代开始就有水中目标前向声散射的相关研究工作 (Ingenito, 1987),但并未引起水声科研人员对水声目标前向散射的重视。直至 20 世纪末期,潜艇降噪和吸波技术得到了巨大的发展,60 年代以后的 30 多年中潜艇的辐射噪声级大约降低了 35dB,潜艇的反射本领也由于消声瓦的使用大约降低了 10dB(某些频段),使得水中隐身目标的探测变得越来越困难,水声探测的紧迫现状使得水声科研人员重新去认识水声目标散射声场的精细特征。

对于水中目标体的前向声散射,也应该满足类似光学中的巴比涅原理。在经典的前向散射目标强度估计理论中 (Urlick, 1983),认为在高频情况下,目标前向散射本领取决于目标在入射波方向的横向投影截面积 A 与入射波长 λ 之比,目标强度近似满足

$$TS = 10 \lg \left(\frac{A}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

根据式 (1.1),对于水下潜艇这类典型目标,采用合适的频率照射时,其前向散射目标强度可达到 $40 \sim 60\text{dB}$,能够高出反向目标强度 20dB 以上。

鉴于前向散射有如此巨大的优势,国外在 21 世纪初开始对水中目标前向声散射探测重视起来。在著名的《2000—2035 年美国海军技术》报告 (Council, 1997) 中提出将前向声散射探测作为主动声呐的四种工作模式之一,用于探测靠近双基地

收发连线的目标,如图 1.1 所示。前向散射探测是与收发合置和收发分置探测不同的一种特殊探测方式。后两者都是利用从目标反向散射的声能来探测目标,而前向散射探测利用了目标靠近发射源和接收基阵之间的连接线时引起的声场变化来探测目标。在该报告中指出采用这种探测方式的优点是可以大大降低发射功率,并增加通过降低目标强度进行水声对抗的难度。利用许多小功率发射源和接收基阵就能构成一个监视网,在潜艇穿过发射源和接收基阵的连接线时对其进行跟踪。前向散射水声探测系统可提高对较大海区的可靠搜索能力,有效对付敌方潜艇所采取的大多数对抗措施。由此可见,前向散射探测在军事上具有重要的应用前景。

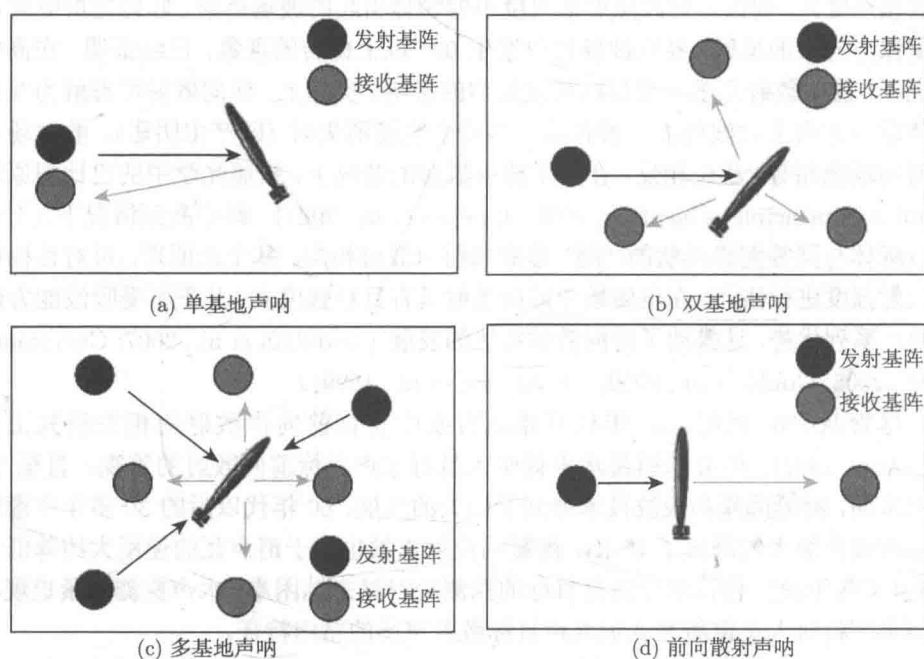


图 1.1 水声主动探测工作模式示意图

声波在海洋里传播受到水体和信道边界的影响,存在着多途、频散等声传播效应,海洋波导中的声传播远比空气中的电磁波传播复杂得多。为了充分发挥前向散射探测的优势,需要解决两方面的基础问题:一个是水中目标体前向散射声场特征表征研究;另一个是水声信道中直达波强干扰下的声场特征提取方法。

1.2 自由空间目标声散射模型

对自由空间中的目标体声散射研究由来已久。由于水声探测的需求,主要关注

于单基地和小分置角的散射特征,少有专门针对目标大分置角或前向声散射的建模方法。目前,一些基于波动方程理论的声散射模型并未对散射角度进行严格限制,因此经改进后可用于前向散射声场特征分析。故此,本节将散射建模的一般方法作为前向散射模型一并总结介绍。

众所周知,水中目标的声散射特征研究具有极其重要的科学理论价值和广泛的实际应用意义。国内外围绕这个问题在声散射理论、声散射计算方法、实验验模等方面进行了广泛而细致的研究,提出了一系列声散射严格理论和近似解法,不仅对水中目标声散射特征有了深入的掌握,还从工程应用角度建立了若干散射特征的预报模型。

对目标散射声场的建模计算,理论上是解一个数学物理问题,在数学上被归纳为在特定的边界条件下求解波动方程问题。对水中物体声散射的建模,主要是对 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程表达式进行数学变换和数值离散化,从而使得复杂情况下的散射变得容易计算。美国物理学家 Waterman(1971,1969) 基于 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程首先提出了计算声散射的 T 矩阵法。此外,还进一步发展出了多层散射体和不同形状散射体的 T 矩阵法,其基本原理是以散射体表面为界,取一个内切球和一个外切球,将直达波声场、散射波声场和格林函数都在相应的区域按球面波本征函数展开。他用一组完备正交的基本函数族的组合来表示矢量形式的内部和外部 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程,利用该方程及位移矢量和张力矢量满足的边界条件,分别用内切球面和外切球面上本征函数积分的正交性,从而得到联系入射波与散射波的展开系数的 T 矩阵表达式,最终得到散射声场。T 矩阵只依赖于散射体的形状和材料性质,在解决弹性体的声散射问题上,特别是对于近球形物体的声散射问题,是比较有效的。T 矩阵法适应条件窄,要求散射体表面光滑,并且其本是凸的。理论上应将 T 矩阵计算到无穷阶叠加,因而在计算中一般都要进行截取,存在截断误差。对于一些目标长度比很大的散射体(如长度比为 10:1 的椭球体),用球函数展开式描述结构表面应力和位移收敛较慢,所需展开式阶数急剧增加,致使 T 矩阵法所涉及的线性方程组的系数矩阵病态化,求解遇到困难。Hackman 等(1988, 1985, 1984) 提出了用椭球函数作为基函数展开的 T 矩阵法,虽然从理论上可以解决上述问题,但在实际运用中椭球函数的运算量非常大,因而也没有太大优越性。

有限元法(Ihlenburg, 1998) 基本思想是使用有限个元素上的声特征量的线性叠加代替 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程中的求积计算,该方法采用了吸收边界条件对无限大空间进行截取。在实际应用中,往往把散射问题分成目标本身的受激振动和刚性体的散射两部分进行处理。前一部分按有限元思想进行离散处理,用数值方法进行求解。后一部分按 Helmholtz-Kirchhoff 积分用解析方法求解。目标的散射场可以看作二者的结合。从原理上讲,这种方法对于外形和结构的要求不严,适

应能力较强。研究人员 (Burnett et al., 2007; Burnett et al., 2006; Zampolli et al., 2004) 开发出了可靠的水中物体散射声场有限元计算软件, 可以方便地计算复杂环境下的近距离散射声场。Shirron 等 (2005) 通过引入完美匹配层, 提出了可计算海底附近目标声散射的有限元方法。

边界积分方法 (Boubendir et al., 2002; Wu et al., 1992; Wu et al., 1991a; Wu et al., 1991b; Seybert et al., 1987; Reut, 1985; Burton et al., 1971) 对边值积分方程问题进行了离散化处理, 在解决辐射和散射问题时受到了很大的关注。它对物体的形状和结构要求更宽, 在大多数情况下对于边界题的积分可以用数值积分进行处理。边界元法将所讨论的边界区域分割为很多微小的单元 (边界元) 的组合, 和通常的有限元法一样进行离散化处理。只要分割适当, 这种数值方法会取得更好的效果。由于在某些特征频率下, 边界元法不能给出唯一解, 在一般使用时, 需要和 CHIEF 方法 (combined Helmholtz integral equation formulatum) (Wu et al., 1991b; Seybert et al., 1987) 或者该方程的法向求导公式 (Burton et al., 1971) 相结合, 避免特征频率下求解的奇异现象。该方法的缺点是当频率比较高时, 需要很细的网格划分, 计算量非常大, 容易引起方法的不收敛, 目前主要致力于解决算法的稳健性问题。例如, Wu 等 (1991a) 提出用柯西积分方程解决方法的不稳健性问题。Hwang (1997) 提出用全局物体表面替代边界元解决散射的积分问题, 减少了计算量。Boubendir 等 (2002) 针对有限元和边界元不完全耦合提出了区域分解法。

对于壳体的散射问题, 采用有限元-边界元耦合方法, 可以充分利用有限元在分析结构响应时的有效性和边界元在分析外场时的快捷性, 在解决复杂问题时获得了应用。频域的耦合方法已经广泛使用。例如, 研究人员 (Jeans et al., 1990; Mathews, 1986) 用有限元-边界元方法分析了三维流/固耦合问题, 求解了球壳的辐射声场; Zeng 等 (1995) 用有限元和边界积分方程方法对柱壳的散射问题进行了求解。目前, 耦合方法的时域模型也开始得到关注和研究 (Gong et al., 2006; Remis, 2000)。上海交通大学对壳体的单基地目标回波特性进行了研究, 并建立了能预报目标强度的板块元模型, 采用有限元-边界元耦合方法分析了弹性目标的声散射问题 (卓琳凯等, 2009, 2007; 范军等, 2001)。中国科学院声学研究所徐海亭等 (1995) 利用边界元和有限元方法, 研究了平顶肋柱壳和部分充水有隔板弹性复杂球壳的声散射, 得到了基本结论。

由于有限元和边界元方法的缺点, 无限元方法 (Hohage et al., 2009; Autrique et al., 2007; Gerdes, 1998; Burnett, 1994) 的研究受到了重视, 它可以用来对声散射问题进行建模。无限元方法截取声场的多极点表达式, 经过近似和离散化后变为包含稀疏矩阵的线性表达式, 研究证明无限元方法比有限元方法更适合解决外部的声散射问题。具有代表性的是 Burnett 等 (2007) 利用椭圆坐标系的多极点表达式来解析散射声场, 取得了一定的效果。

边界元-特征波函数展开法作为 T 矩阵法的改进, 对外部声场采用特征波函数展开, 对弹性结构体则采用边界元法。Su 等 (1980) 用这种方法计算了带球帽有限长薄壳柱在声波正入射时水中目标的散射特性, 计算所用时间比 T 矩阵法少, 且结果更准确。有限元-特征波函数展开法先在电磁波散射问题中采用, 称为单一矩法 (谭红波, 2002; 鲁述等, 1993)。其基本思想是用假想的球面包围散射体, 球内部用有限元离散化近似。球外区域的声场采用球面波函数展开, 使问题变得比较简单。用这种方法可以计算弹性圆盘、有限长有棱角弹性圆柱、无限长有棱角的刚性柱等目标的散射。由于球面波函数在球面上正交, 入射波各球面波分量的散射是相互独立的, 可逐个计算, 故不存在用有限元-积分方程法计算时声介质阻抗矩阵破坏有限元矩阵窄带性质的困难, 球面内包括部分流体和弹性体, 通常选用声压和位移两种不同的物理量为自变量, 需要通过耦合矩阵在边界上将两者耦合起来。这种方法用有限元方程描述弹性结构的部分邻近流体, 在球面外区域采用球面波函数展开, 对弹性结构和复杂外形都有较强的适应能力, 是一种能稳定地得到较好结果的解法。

作者所在课题组依据变形柱方法计算了有限长不锈钢圆柱壳的前向和反向散射声场, 并设计开展了消声水池实验 (Lei et al., 2010), 获得了首个关于前向和反向散射目标强度对比的实验结果。

1.3 水声信道中目标的前向散射模型

对于水声信道中的目标, 作用到目标的入射声场远比自由空间中的入射平面波复杂, 而且散射波也不再简单按照球面扩展规律衰减, 信道对声散射的影响显著。根据信道中目标散射的声传播—散射耦合—传播这一过程描述, 信道中的目标散射建模方法可以分为如下几类: 简正波—散射形态函数耦合方法、抛物方程方法、虚源方法、波数积分—散射形态函数耦合方法等。

1. 简正波-散射形态函数耦合方法

Hackman (1984) 将 T 矩阵方法与简正波声传播模型结合, 建立了波导中弹性椭球体的散射声场计算模型。在模型中利用椭球函数正交基展开式来表征目标表面的声压和格林函数, 并引入旋转变换实现椭球坐标系与圆柱坐标系的转换。总声场由两部分组成: 第一部分对应了入射声场 (无目标时的声场); 第二部分对应了目标的散射声场, 散射声场的强度与强度系数有关, 而强度系数需要单独计算。整个模型的求解过程相当烦琐, 而且 T 矩阵方法的计算量非常巨大。此外, 模型中使用了自由空间中的格林函数而非信道中的格林函数。

与 Hackman 的建模思想类似, Ingenito(1987) 建立了等声速波导中刚性球的散射声场模型。该模型以 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程为基础, 将入射声波和格林函数分别表示为声场模态的级数形式; 在目标表面上将入射波和格林函数用球谐函数展开, 忽略目标和边界之间的多次散射, 再结合球体表面的刚性边界条件得到散射声场的表达式。该表达式同时包含了入射模态、散射模态以及目标在自由空间的散射形态函数。该模型的最大贡献在于指出了信道中目标声散射的物理本质: 目标会引起散射和入射模态之间的耦合, 耦合强度和形式取决于目标的散射形态函数。这一散射模型可以推广到非均匀声速波导以及非刚性、非球形的散射体, 并且得到了广泛应用。

2. 抛物方程方法

Collins 等 (1989) 充分利用匹配渐近极限条件, 建立了信道中目标声散射的抛物方程模型。该模型将信道中的声散射问题分解为内域和外域问题。在内域中利用 T 矩阵方法计算目标在均匀半空间中的指向性函数和散射声场, 在外域中用抛物方程方法将内域的散射声场“传播”出去, 最后将散射声场表示为入射声场、目标散射指向性函数及目标表面到场点的格林函数三者乘积的形式。该模型的特点在于充分利用小掠射角渐近条件并计入了目标和界面之间的多次散射, 能够实现时域声场计算和三维声场计算。该方法在低频、小掠射角、远距离接收条件下, 能够简化目标声散射问题并实现快速计算。Levy 等 (1998,1996) 利用有限差分方法求解二维条件下的三对角矩阵和三维条件下的稀疏矩阵, 分别建立了二维和三维条件下复杂目标的散射声场模型。

3. 虚源方法

虚源方法又称波叠加法, 该方法的核心思想在于用一系列分布于目标内部封闭曲面上的虚拟点声源产生的叠加声场来近似目标的实际散射声场, 其关键点在于虚源强度的计算。Sarkissian(1994a,1994b) 利用该原理计算了加有半球形端盖的刚性圆柱体在等声速波导中的散射声场, 采用多个点源和表面上的节点, 利用自由空间中的格林函数计算点源在节点上产生的法向振速。依据刚性边界条件, 点源产生的法向振速与入射声场在节点上产生的法向振速之和为零, 从而得到线性方程组, 然后通过最小二乘法求得点源的强度。散射声场等效于这些点源形成辐射声场的线性叠加。当目标表面为非刚性时, 可以通过其他方法预先获得表面的法向振速分布, 然后再求解点源的强度。Stepanishen(1997) 利用虚源方法建立了自由空间中具有旋转对称性的三维目标的散射声场模型, 将一系列圆环状声源沿着散射体的旋转对称轴排列, 然后将散射体表面的声场用一系列的环境谐波表征, 每一阶谐波对应的声场强度与这些圆环声源的强度有关, 通过奇异值分解方法得

到所有圆环声源的强度。模型中用到的边界条件为理想的狄利克雷和纽曼边界条件。Schmidt(2004) 进一步发展了该理论, 将虚源方法与波数积分模型结合, 建立了可计算信道中全掩埋或半掩埋物体等更复杂情况的波数积分-虚源耦合三维声散射计算模型。他将散射体表面上声压与法向位移之间的关系用表征散射体结构的固有频率特性的刚度矩阵表示, 从而得到虚源的复强度。球形物体的刚度矩阵可以用球谐函数表示, 对于结构复杂的目标, 可以通过有限元等数值方法预先获得刚度矩阵。可通过傅里叶-贝塞尔波数积分计算每一个虚源产生的声场, 总声场等于虚源声场的叠加求和。该方法包含了目标与边界之间的多次散射效应, 因此非常适用于解决信道中掩埋物体的跨界面声散射问题。作者所在的课题组利用虚源思想研究了掩埋物体和大分置角情况下的物体散射问题, 获得了掩埋目标的等效目标强度(雷波等, 2008; 杨坤德等, 2007)。

4. 波数积分-散射形态函数耦合方法

Makris(1998) 将波数积分声传播模型与目标的散射形态函数结合, 建立了水平分层信道中球体的三维散射模型。该模型用一维波数积分表征球体的三维散射声场, 散射声场与信道中下行和上行平面波的幅度、目标在自由空间的散射形态函数等因素有关, 极大简化了计算流程。此外, 该模型的另一个优势在于能够较准确计算目标的散射近场。如果忽略目标和信道边界之间的多次散射效应, 该方法也同样适用于声源和接收点到目标的距离都充分远的情形。

国内的水声工作者对于信道中的目标散射模型也做了相关研究(范威等, 2012a, 2012b; 王桂波等, 2005), 主要是将不同计算方法得到的目标散射形态函数与简正波模型进行耦合, 获得了水声信道中目标散射的部分特征和规律。

1.4 目标前向散射声场特征的检测方法

当物体靠近双基地收发连线时, 在目标体对声波的前向散射作用下, 接收端会几乎同时收到来自声源的直达波信号和目标的前向散射信号。从理论上来说, 当发射信号具有很高的距离分辨率时, 可通过脉冲压缩技术分离两个信号。但是, 由于信道的多途和频散效应, 接收信号产生时延扩展, 从而使得直达波和前向散射信号时间上产生重叠。一般情况下, 直达波信号比前向散射信号可高出 20dB 以上, 对需要检测的前向散射信号产生很强的干扰。因此, 在远距离情况下, 目标前向散射导致的声场异常变化相对微弱。为了实现对目标的前向散射探测, 就需要掌握目标的前向散射特征。目前对前向散射特征表征及其检测方法主要包括基于以下原理的几种。