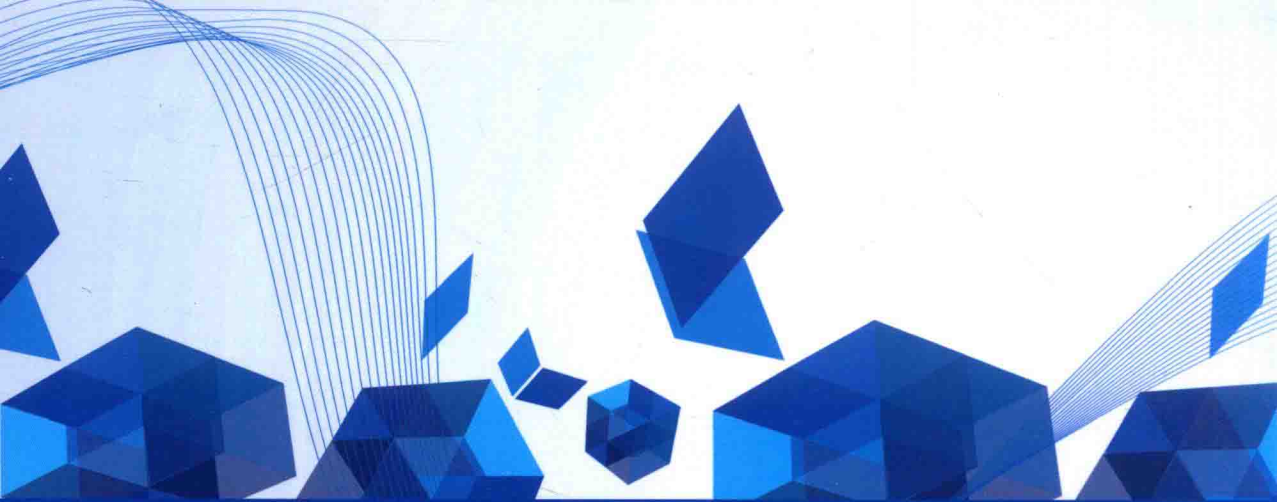




声呐障板下矢量水听器 应用引论

朱中锐 著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

声呐障板下矢量水听器应用引论

朱中锐 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书在介绍了自由场条件下矢量信号处理基础及结构振动与声辐射的基础上,以船舶上三种典型声呐设备障板——矩形、圆柱形和球形障板为研究对象,推导了上述三种障板水下声散射声场的解析解,给出了上述三种障板声散射近场矢量特性以及相应障板条件下矢量信号处理方法。全书由四章组成,包括:矢量水听器应用需求及声呐障板下矢量水听器应用相关基础理论,平面障板下矢量水听器应用,圆柱形障板下矢量水听器应用,球形障板下矢量水听器应用等。本书还给出了声呐障板下矢量水听器应用的大量的水池和湖上试验结果。

本书是关于矢量水听器及其工程应用的书籍,可供水声工程领域的广大技术人员使用,也可作为高等院校和科研院所水声专业高年级本科生、研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

声呐障板下矢量水听器应用引论 / 朱中锐著. — 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1030 - 5

I. ①声… II. ①朱… III. ①矢量 - 水听器
IV. ①TB565

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 096449 号

出版发行	哈尔滨工程大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码	150001
发行电话	0451 - 82519328
传 真	0451 - 82519699
经 销	新华书店
印 刷	哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本	787 mm × 960 mm 1/16
印 张	9.75
字 数	208 千字
版 次	2015 年 5 月第 1 版
印 次	2015 年 5 月第 1 次印刷
定 价	36.00 元

<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

矢量水听器的出现,突破了声呐设备获取水下声信号长期依靠标量声压水听器的限制,为我国声呐技术的发展开辟了新的途径。矢量水听器可以空间共点同步拾取声场一点处的声压和质点振速矢量,利用获取的声压和质点振速可在全空间对声源进行无模糊定向,且获得等价于四元声压阵声呐系统的检测性能,这种水声传感器的紧凑型配置方式为解决水下小尺度平台湿端布置空间受限的问题提供了很好的解决方案。矢量水听器还具有不依赖于声波频率的空间指向性这个显著优点,这个优点在水声系统低频化发展的趋势下显得尤为突出,能够使得基于矢量水听器的声呐系统具有更好的低频适应性。当利用多个矢量水听器组成声呐基阵时,能够将矢量水听器的抗噪能力和阵列系统的空间分辨能力有机地结合起来,进一步提高声呐系统的性能,获得比相同数目的声压阵更好的性能,或者在相同的性能指标要求下,能够显著地减小阵元数目。矢量水听器的诸多优势使得这项技术已经成功应用于低噪声测量系统、海上浮标声呐、拖曳阵声呐等水声设备中。但是,上述应用都是假设矢量水听器处于自由场条件下,当矢量水听器安装于水面船舶或水下航行器等载体时,由于载体声学散射的影响,会导致矢量水听器性能的发挥受到极大影响。矢量水听器如何在水面和水下载体上应用,并且可以取得海上声呐浮标设备那样的良好效果,成为急需解决的一个难题。

声呐基阵是声呐系统的重要组成部分,大多安装在水面舰艇、潜艇、鱼雷和水雷等水面和水下载体的壳体上。水面舰艇和潜艇等载体是一个非常复杂的结构体,其内部舱室、管路、局部结构等对入射声场具有强烈的散射作用,使得声呐基阵各基元的接收信号发生改变,严重影响阵元域信号间的相关性,同时,水面舰艇和潜艇等载体还是一个复杂的噪声源,包括螺旋桨噪声、机械噪声和水动力噪声。每种源所产生的声和振动,通过不同的路径到达声呐基阵,极大地影响了声呐系统的性能。为了提高声呐系统的抗干扰性能,工程中实际使用的声呐基阵一般都带有声呐障板。声呐障板的作用是屏蔽或降低基阵载体的结构振动辐射噪声,均化局部声场,保证信号的空间相关性等。理论分析表明,声呐障板还有提高基阵信噪比,改善基阵的方向性的作用。因此,声呐基阵往往都带有声呐障板。

针对障板散射声场的影响,最容易想到的是如何克服或减小障板的散射作用,即使用不改变声场的“透明”基阵。然而在工程上要采用较好的吸声障板是很困难的,除了障板结构较复杂外,主要是因为没有能够具有宽频带吸声性能,同时还能满足水下载体强度要求的材料;或者使水听器远离安装平台,但这会带来适装性问题以及水面和水下载体机动性问题。因此,矢量水听器要在水面和水下载体上使用就必须解决声呐障板下矢量声场分布以及相应的信号处理等基本问题。显然,这些问题不解决,就无法实现矢量水听器在水面舰船和水下航行器上的使用。这也是自矢量水听器问世以来长期受备关注的问题之一,更是急需解决的一个难题。本书以船舶上三种典型声呐障板——矩形、圆柱形和球形障板为模型,研究此三种障板条件下矢量水听器应用的基本原理和方法。

全书共分四章。第1章介绍了声呐障板下矢量水听器应用的预备知识,包括自由场条件下矢量水听器的应用以及水下结构声问题。第2章为矩形声呐障板下矢量水听器应用。针对矩形障板,以工程实际中使用的弹性矩形空气腔障板为研究对象,探讨了弹性矩形空气腔障板水下声散射,给出了弹性矩形空气腔障板水下声散射声场的近似解析解,建立了反射系数所表征的矩形空气腔障板下矢量线阵的测量模型。基于该测量模型研究了矩形障板下矢量线阵阵列信号处理方法,在直接阵元域实现了声压和振速的相干信号处理。第3章为圆柱形声呐障板下矢量水听器应用。针对圆柱形障板,考虑工程实际,采用密闭的圆柱形空气腔壳体作为圆柱形基阵的反声障板。首先研究有限长圆柱壳体水下声散射,在前人研究的基础上,采用弹性力学中的薄壳理论(Donnell方程)表述圆柱壳体运动,并在一定的近似假设下给出了有限长圆柱空气腔壳体表面水下声散射声场的解析解,在此基础上将传统的障板下标量圆弧阵的相位模态域信号处理方法引入圆柱形障板下的矢量圆阵,提出了矢量圆阵声压振速相位模态域阵列信号处理方法,在相位模态域实现了声压和振速的相干处理,从而将矢量水听器的适用范围扩展至圆柱形障板条件。第4章为球形障板下矢量水听器应用。首先采用薄壳理论和分离变量法研究球形空气腔壳体障板水下声散射,在此基础上从球形障板下声矢量圆阵阵元域信号的表达式出发,将阵元域信号表示为若干阶正交的相位模态,在相位模态域进行方位估计,实现了球形障板下声压和振速的相干处理,将矢量水听器的适用范围扩展至球形障板条件。

本书还设计了矩形空气腔障板三元矢量线阵和圆柱形空气腔障板八元矢

量圆阵水声试验系统,开展了外场试验,给出了丰富的外场试验结果,为矩形空气腔障板和圆柱形空气腔障板下矢量水听器的工程应用提供了试验基础。

本书是一本阐述声呐障板下矢量水听器应用原理的专著,属于矢量水听器应用的范畴。书中大部分内容是根据作者这几年的科研工作写成的,书中所涉及的方法大多是作者及合作者近年来提出并已在期刊上公开发表的方法。此外,书中也介绍了其他学者近年来提出的一些方法。在本书所述内容相关的科研工作中作者得到了导师杨德森教授的悉心指导,在此表示衷心感谢!

另外作者在撰写过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者
2015.4

目 录

第1章 基本知识	1
1.1 引言	1
1.2 典型声呐障板	5
1.3 水下结构声问题	7
1.4 自由场假设下矢量水听器应用基础	13
1.5 本书的结构	26
第2章 平面障板下矢量水听器应用	28
2.1 引言	28
2.2 弹性矩形空气腔障板声散射	29
2.3 平面障板下矢量线阵测向方法	52
2.4 仿真结果	56
2.5 试验结果	63
第3章 圆柱形障板下矢量水听器应用	76
3.1 引言	76
3.2 柱坐标系	77
3.3 弹性圆柱薄壳声散射	78
3.4 圆柱形障板下矢量圆阵信号处理	90
3.5 仿真结果	96
3.6 试验结果	106
第4章 球形障板下矢量水听器应用	120
4.1 引言	120
4.2 球坐标系	120
4.3 弹性球壳声散射	121
4.4 球壳声散射数值计算和分析	125
4.5 球形障板下矢量圆阵信号处理	133
4.6 仿真结果	137
参考文献	141

第1章 基本知识

1.1 引言

1.1.1 矢量水听器技术

声呐是水下信息获取和传递的重要基础仪器,水听器是声呐获取水下声信号唯一的传感器。各个国家的声呐技术水平一直是评价国家海洋监测总体水平的重要因素之一。长期以来,声呐站的水下传感器一直使用标量声压传感器,使得水下湿端技术的发展受到了限制。20世纪90年代,我国通过技术引进和国际合作研究,成功地研制了水下声矢量信号传感器,又称为矢量水听器。矢量水听器技术是最近二十年来备受水声界关注的研究焦点之一,1998年声矢量水听器在哈尔滨工程大学研制成功,改变了我国长期以来依靠标量声压水听器获取声信号的状况,也使我国在此领域的研究与世界先进水平同步发展,并且有些方面已经处于世界前沿,为我国声呐技术的发展开辟了新的途径。

作为水声物理量的测量设备,声矢量水听器可以空间共点同步拾取声场一点处的声压和质点振速的三个正交分量,利用获取的声压和质点振速分量可以在全空间对声源进行无模糊定向,获得等同于四元声压阵声呐系统的性能,这种水声传感器的紧凑型配置方式为解决水下小尺度平台湿端布置空间受限的问题提供了很好的方案。同时,和相同阵型的声压阵相比,矢量水听器阵具有更好的检测和估计性能,或者在相同的技术指标要求下,矢量水听器阵体积显著小于声压阵体积,避免复杂的设备,设备体积显著减小,船舶适装性明显提高;另外,矢量水听器还具有与频率无关的“8”字形指向性,具有较强地抑制各向同性噪声能力等诸多优点。基于上述优点,矢量水听器在实际中得到了广泛地应用,其主要应用领域可以覆盖水声警戒声呐、拖曳线列阵声呐、水雷声引信、鱼雷探测声呐、多基地声呐、水下潜器的导航定位、分布式传感器网络等。

美国、俄罗斯等国家投入大量精力对矢量水听器工程制作和应用技术进行研究,经过多年的努力,关于声矢量水听器的物理基础和工程制作等方面的问题已经基本解决,性能稳定的矢量水听器已进入工程应用阶段。国内有关矢量水听器的工作开始于1997年,哈尔滨工程大学在国内首次系统地开展了矢量水听器专题研究,并于1998年和2000年进行了国内最早的矢量水听器的外场试验^[1,2],对单只矢量水听器远程弱信号检测、方位估计和目标跟踪等方面的性能进行了研究^[3-6]。目前,国内水声界,包括哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、上海726研究所、杭州715研究所、大连760研究所、西北工业大学、东南

大学、南京大学以及海军工程大学等单位都在积极地进行矢量水听器相关理论与技术的研究。

实际上,在远程声场条件下,有限尺度声源信号的声压和振速是相关的^[3],而对于各向同性噪声场,声压和振速是不相关的^[4],所以基于声强概念的声压和振速联合信号处理技术具有较强的抗各向同性噪声能力^[3,5,6,7],适合于弱信号的检测与估计。Gordienko 认为^[8],在海洋中对于相干源远场,声压和水平方向质点振速在声传播过程中的幅度起伏平均不超过 0.5 dB,相位起伏为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。文献[5]是基于湖试的试验数据,确认了基于声强概念的声压和振速联合信号处理技术具有良好的抗噪能力。

在声矢量阵信号处理方面,美国耶鲁大学的 Arye Nehorai^[9]将声矢量水听器纳入经典的水声信号处理框架,将声矢量水听器的振速分量作为独立的阵元信息来处理,指出声矢量阵列信号处理和传统的声压阵列信号处理并无本质的区别。Nehorai 教授的研究对矢量阵列信号处理的影响深远,很多学者在此基础上发表了一系列文章^[10-16]。空间谱估计中的众多优秀算法也陆续应用到矢量阵信号处理中,香港大学的 K. T. Wong 教授在这方面的工作引人注目^[17-24]。K. T. Wong 于 1997 年分别提出了基于扩展孔径均匀组合水听器线列阵和任意形状组合水听器阵的 ESPRIT 算法,并指出扩展孔径声矢量水听器线阵的性能优于相同孔径、阵元间距为二分之一波长的声压水听器线阵^[18,19]。K. T. Wong 还研究了振速水听器的求根 MUSIC 方位估计算法和基于自初始化 MUSIC 算法的定向方法^[20]。

国内学者也对矢量阵列信号处理进行了广泛而深入的研究。孙贵青^[25-29]等研究了矢量阵组合波束形成方法,比较了几种矢量波束形成器的性能,给出了典型检测器的阵增益,推导了矢量阵方位估计 CRB 界。矢量阵常规波束形成仍然受限于瑞利准则,为了进一步提高矢量阵的空间分辨力,国内学者还进行了矢量阵高分辨算法^[30-40]。白兴宇^[41-43]等提出了声压振速联合信号处理方法,将子空间类方法的高分辨能力和矢量水听器的抗噪能力有机结合起来,实现了远程高分辨 DOA 估计。

1.1.2 矢量水听器应用需求及限制

在自由场条件下,相干源辐射远程声场的声压与振速是相关的,而对于各向同性噪声场,共点同步测量的声压与振速是不相关的,声压与振速的这种相关性差别是矢量水听器进行联合信息处理的基础。矢量水听器同时获取了水下声场中声压标量和质点振速矢量,通过对水下介质质点振速信号与共点同步获取的声压信号的联合处理,能够很好地抑制各向同性背景噪声,准确获得水下目标辐射声强度矢量。由于海洋环境背景噪声中具有非相干分量,因此对水下声矢量信号的获取和处理为新型声呐接收信号信噪比的提高带来了明显优势,理论与海试结果均表明声呐作用距离明显提高^[3,5,6]。同时,由于传统的标量水听器需通过多个传感器组成声呐基阵来获得目标方位,所以传统的声呐基阵的体积均较大。而矢量水听器则不然,由于它能够直接获取目标的声强度矢量,通过计算水下声场中不同方向

的声强度的比值可以简单地获取目标方位信息,即

$$\hat{\theta}(t) = \arctan \left[\frac{I_y(\mathbf{r}, t)}{I_x(\mathbf{r}, t)} \right] \quad (1.1)$$

式中, $I_x(\mathbf{r}, t)$, $I_y(\mathbf{r}, t)$ 分别为 xoy 平面两个正交方向上的声强度信息。

对于各向同性噪声场, 不仅共点同步测量的声压与振速是不相关的, 当阵元间距满足条件时, 空间不同阵元上测得的声压与振速也是不相关的。当利用多个矢量水听器组成声呐基阵时, 能够将矢量水听器的抗噪能力和阵列系统的空间分辨能力有机地结合起来, 进一步提高声呐系统的性能, 获得比相同数目的声压阵更好的性能, 或者在相同的性能指标要求下, 能够显著地减小阵元数目。另外, 和声压水听器相比, 矢量水听器还具有和频率无关的低频指向性这个显著优点, 这个优点在水声系统低频化发展的趋势下显得尤为突出, 能够使得基于矢量水听器的声呐系统具有更好的低频适应性。由此可知, 使用矢量水听器研制声呐可以更简单地获取目标的方位信息, 避免复杂的设备, 设备体积显著减小, 船舶适装性明显提高。

矢量水听器的诸多优势使得这项技术成了许多国家优先发展的技术, 已经成功应用于低噪声测量系统、海上浮标声呐^[44,45]、拖曳阵声呐^[46]等水声设备中, 并取得了设备简单、质量轻、可靠性高、目标探测能力强等一系列较为理想的效果。由于矢量水听器具有优良的工作性能, 人们在研究和发掘矢量水听器的使用范围时, 自然地企求矢量水听器能尽快在水面舰船和水下航行器上全面取代标量水听器。当矢量水听器安装于水面船舶和水下航行器等载体时, 由于载体声学散射的影响, 会导致矢量水听器性能的发挥受到极大影响。矢量水听器如何在水面和水下载体上应用, 并且取得海上声呐浮标设备那样的良好效果, 成为急需解决的一个难题。

声呐基阵是声呐系统的重要组成部分, 大多安装在水面舰艇、潜艇、鱼雷和水雷等水面和水下载体的壳体上。水面舰艇和潜艇等载体是一个非常复杂的结构体, 其内部舱室、管路、局部结构等对入射声场具有强烈的散射作用, 使得声呐基阵各基元的接收信号发生改变, 严重影响阵元域信号间的相关性, 同时, 水面舰艇和潜艇等载体还是一个复杂的噪声源, 包括螺旋桨噪声、机械噪声和水动力噪声。每种源所产生的声和振动, 通过不同的路径到达声呐基阵^[47], 极大地影响了声呐系统的性能。为了提高声呐系统的抗干扰性能, 工程中实际使用的声呐基阵一般都带有声呐障板。声呐障板的作用是屏蔽或降低基阵载体的结构振动辐射噪声, 均化局部声场, 保证信号的空间相关性等。理论分析表明, 声呐障板还有提高基阵信噪比, 改善基阵的方向性的作用^[48]。因此, 声呐基阵往往都带有声呐障板。

针对障板散射声场的影响, 我们最容易想到的是如何克服或减小障板的散射作用, 即使用不改变声场的“透明”基阵。然而在工程上要采用较好的吸声障板是很困难的, 除了障板结构较复杂外, 主要是因为没有具有宽频带吸声性能, 同时还能满足水下载体强度要求的材料; 或者使水听器远离安装平台, 但这会带来适装性问题以及水面和水下载体机动性问题。因此, 矢

量水听器要在水面和水下载体上使用就必须解决声呐障板下矢量声场分布以及相应的信号处理理论等基本问题。显然,这个问题不解决,就无法实现矢量水听器在水面舰船和水下航行器上的使用。这是自矢量水听器问世以来长期备受关注的问題之一,也是急需解决的一个难题。

1.1.3 声呐障板下矢量水听器应用的研究现状

当矢量水听器安装于水面平台和水下载体时,由于声学散射的影响,声场不再满足自由场假设,会导致矢量水听器性能大为下降。如何在障板条件下应用,并且使矢量水听器可以取得海上声呐浮标设备那样的良好效果,成为急需解决的一个难题。实际上,声呐障板下矢量水听器的应用涉及两个方面的内容:一是障板声散射近场矢量声场研究,二是障板条件下声矢量信号处理研究。

水下目标声散射特性研究是水声工程中的重要课题,其关注的重点是目标的远场声散射问题^[49-60],而很少考虑目标的近场声散射问题。目标近场声散射的研究工作,多见于早期的文献和专著中,主要探讨声呐基阵声呐障板的研究设计^[61-73],关注的焦点是声呐障板声散射对声呐系统性能的影响。文献[61]利用弹性理论最小势能原理和变分技术,研究了矩形弹性-黏弹性复合板的振动情况,文献[62]在文献[61]的基础上,利用简正模式分析和傅里叶变换方法研究了矩形弹性-黏弹性复合板的散射声近场,文章所得结论可以用来分析水下矩形复合板障板近场声散射。文献[71]研究了带障板的水声线列阵相控波束指向性问题,指出对于相控阵,障板的性能可能使基阵的性能恶化,比如使单元波束变窄,从而限制了波束的扫描范围,并使得波束出现转角且旁瓣级增大,为带障板相控阵的工程设计提供了理论指导。文献[73]研究了平面反声障板以及阵元互耦合对基阵自然指向的影响,指出对带障板线列阵自然指向性来说,复合层空气腔障板是一种较为合适的反声障板。文献[64]研究了圆柱形空气腔壳体反声障板对圆柱阵水平指向性的影响,指出圆柱形空气腔壳体反声障板可起到增加基阵空间处理增益和抑制背后点源干扰的作用,实验验证了理论分析的正确性。针对圆阵阵型和复合层障板问题,文献[65]研究了镶在圆柱障板上单块有限复合板的振动特性和近场声散射问题,所得结果能够定性分析类似模型障板的振动特性和近场声散射问题。另外,水声换能器声波接收理论也涉及目标近场声散射问题,关注的重点是水声传感器自身衍射对测量声场的畸变以及由此带来的测量误差^[74,75]。近年来,出于各自不同的目的,不少学者开始关注目标近场声散射问题。为了评价声呐浮标电子舱对声压水听器噪声测量结果的影响,Kosobrodov 等人研究了钛合金薄壁球壳近场声散射问题,并进行了相关的实验研究,实验结果和理论分析符合程度良好^[76]。J. P. Barton 等学者研究了有限长刚性椭球柱面的近场声散射问题,并对其散射声场特性进行了分析^[77]。为了研究目标前向声散射矢量声场是否提供比标量场更多的信息,B. R. Rapids 等研究了刚性椭球体的近场声散射问题^[78]。

随着矢量信号处理技术研究的不断深入以及矢量水听器使用范围的不断拓展,有些学

者开始关注平面障板下的矢量阵列信号处理。耶鲁大学的学者 M. Hawkes^[79] 对平面障板条件下的矢量水听器信号处理技术进行了探讨,在矢量水听器信号处理过程中,将潜艇舷侧等效为无限大的平面障板,考虑了障板的反射系数,建立了无限大平面障板条件下矢量面阵的测量模型。Javad Ahmadi - Shokouh 等对有/无平面反射障板两种情况下单矢量水听器 DOA 估计的克拉美罗下限(CRLB)进行了研究^[80]。

水下平台在利用矢量水听器对目标声场进行空间采样,实行空域滤波时,希望尽可能不破坏目标声场的信息结构。实际工作中,由于水下安装平台的散射作用,声场信息结构被破坏,声场表现为复杂的干涉结构,原有的基于自由场假设的矢量信号处理方法不再适用。针对散射声场的影响,我们最容易想到的是如何克服或减小水下安装平台的散射作用,即使用不改变声场的“透明”基阵。然而在工程上要采用较好的吸声障板是很困难的,除了障板结构较复杂外,主要是因为没有能够具有宽频带吸声性能,同时还能满足水下载体强度要求的材料;或者使水听器远离安装平台,但这会带来适装性问题以及水下载体机动性问题。因此,矢量水听器要在船舶上使用就必须解决各种典型障板下矢量水听器的使用这个基础问题。文献[61][62][76][77]研究了物体的近场声散射问题,但仅仅限于声压场,文献[78]研究了物体近场声散射的矢量声场,但仅仅讨论了声强场,没有讨论振速场。文献[79][80]讨论了平面分界面条件下的矢量阵列信号处理,但是在处理障板声散射问题时,将障板看成无限大绝对硬和绝对软分界面,与工程实际并不符合。N. Zou 在文献[81]中研究了圆柱形障板条件下声矢量圆阵相位模态域波束形成方法,但是其方法仅仅利用了矢量水听器输出的径向振速分量和切向振速分量进行模态域信号处理,没有利用声压分量,没能实现声压和质点振速的联合信号处理,损失了一定的空间增益,也无法实现性能稳健的声强处理;同时,在建立物理模型时,没有考虑圆柱形声呐障板有限长度的影响,用无限长圆柱形障板来近似有限长圆柱形障板,实际上忽略了有限长度引起的模态共振,与工程实际并不符合。可见,针对障板条件下矢量水听器应用这一难题,目前仍然欠缺对典型障板下矢量声场分布以及相应的信号处理理论等基本问题的研究,基于矢量水听器的新型声呐还未能能在船舶上成功使用。

1.2 典型声呐障板

声呐基阵是声呐系统的重要组成部分,大多安装在水面舰艇、潜艇、鱼雷和水雷等水面和水下载体的壳体上。水面舰艇和潜艇等载体是一个非常复杂的结构体,其内部舱室、管路、局部结构等对入射声场具有强烈的散射作用,使得声呐基阵各基元的接收信号发生改变,严重影响阵元域信号间的相关性,同时,水面舰艇和潜艇等载体还是一个复杂的噪声源,包括螺旋桨噪声、机械噪声和水动力噪声。每种源所产生的声和振动,通过不同的路径到达声呐基阵^[47],极大地影响了声呐系统的性能。为了提高声呐系统的抗干扰性能,工程中实

际使用的声呐基阵一般都带有导流罩和声呐障板,导流罩的作用是减小湍流,延迟空化的发生,减小载体运动时的水动力噪声并使得水动力噪声与换能器隔离,同时保证良好的透声性能。声呐障板的作用是屏蔽或降低基阵载体的结构振动辐射噪声,均化局部声场,保证信号的空间相关性等。理论分析表明,声呐障板还有提高基阵信噪比,改善基阵的方向性的作用^[48]。因此,声呐基阵往往由水声换能器、声呐障板以及导流罩组成。另外,为了尽可能减小环境自噪声的影响,声呐基阵往往安装于远离螺旋桨和主机的水面舰艇和潜艇的艏部。

图 1.1 给出了水面舰船声呐、潜艇综合声呐以及潜艇舷侧阵声呐各自声呐基阵的组成和布放示意图。水面舰船的声呐基阵多数安装在舰艇艏部下方的球鼻艏内,基阵形式往往采用圆柱形声呐基阵,相应的声呐障板为圆柱形。潜艇的综合声呐基阵多数安装在艇体艏部,基阵形式往往采用圆柱形或球形声呐基阵,相应的声呐障板也为圆柱形或球形。之所以采用圆柱形或球形声呐基阵而不采用面阵,一是由于载体安装位置的几何形状,二是由于圆阵阵型能够提供 360°全方位、无模糊的方位信息,而面阵只能提供 180°无模糊的方位角信息,而且由方向图可知其空间分辨力在法线方向最高,而在端射方向最差,所以真正有效方位大约只有 120°。另外,航空吊放声呐、声呐浮标、岸基声呐基阵也可采用圆柱形或球形声呐基阵。为了适应声呐系统低频、大功率、大孔径基阵的发展需要,近年来发展了舷侧阵声呐,其声呐基阵紧贴在潜艇的两边舷侧上,阵的尺寸可达几十米,基阵形式采用线阵形式,其声呐障板为矩形平面障板。另外需要特别说明的是,在现行的浮标声呐等非水下移动平台基的声呐系统体系结构中,为了减小水下电子舱声散射对声呐系统的影响,往往将接收基阵和水下电子舱分开设计,导致系统尺度大,布放和回收极其不便。如将浮标声呐的接收基阵和电子舱一体化设计,将带来很大的优越性:一是在信号处理时将电子舱的声散射影响考虑在内,将声散射的影响完全消除;二是可以利用声呐障板提高基阵信噪比、改善基阵方向性的作用来提高系统性能;三是体系结构的变化带来工程使用的极大方便。

从声学作用来看,障板可分为反声障板、吸声障板、阻尼降噪障板以及多功能橡胶模块等^[48]。声呐换能器基阵往往采用反声障板,理想的反声障板应当使入射声波 100% 地被反射回去,这就需要声呐障板材料为失配型材料。工程中常常用闭孔泡沫塑料或泡沫橡胶作为反声材料,然而这些材料都不能负荷高流体静压力的作用,在深水中会变形,导致声呐系统性能下降,为了解决这个问题,可采用金属薄板焊接成空气腔做成反声障板,内部配以一定数量的加强筋增加障板的结构强度和耐压性能,封闭的空气腔和水阻抗严重失配,起着良好的去耦和反声作用。如图 1.1 所示的三种典型声呐障板,在实际工程中也常常采用内部密闭空气腔,外部以金属材料包覆这种形式。本书即介绍矢量水听器在矩形、圆柱形和球形空气腔障板条件下的应用,具体说,是研究矩形、圆柱形和球形空气腔障板水下声散射及其近场矢量特性,以及相应障板条件下的矢量信号处理问题。

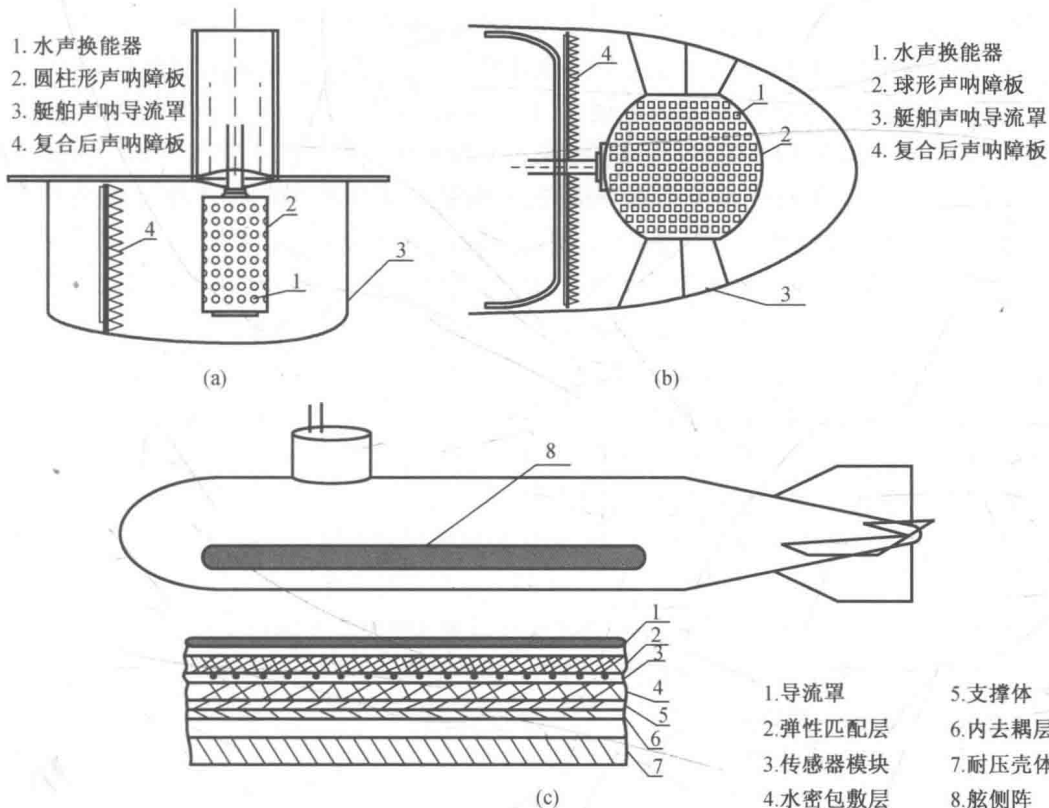


图 1.1 典型声呐系统的组成和布放示意图

(a) 圆柱阵; (b) 球阵; (c) 舷侧阵

1.3 水下结构声问题

水下结构声问题分为声散射和声辐射,是声学的基本问题,从本质上讲,声散射和声辐射是同一类问题。随着水声对抗技术的不断进步与发展,潜艇的声隐身变得越来越重要,各国纷纷对潜艇采取有效的减震降噪措施,已大大降低了潜艇的噪声水平和目标强度;同时,潜艇声隐身技术的发展,使得不论是采用被动声呐还是主动声呐探测水下潜艇都变得越来越困难,从而对声呐系统性能提出了全新的要求。可见,水声对抗的两个方面是:降低目标辐射噪声和减小目标强度;增大声呐的探测距离。实际上,水下结构声问题是水声对抗技术的重要基础性课题,其内容涉及水声对抗技术的许多方面,如水下典型结构体的声辐射和声散射特性,水声基阵的研究设计,声呐障板声散射对声呐系统性能的影响,声呐导流罩结构与声学的研究及设计等。因此,水下结构声问题的研究一直备受关注,发表的论文浩如烟

海。在早期的结构声研究中,把振动的物体作为声源,单独研究其结构振动特性,而后在计算声场时,把结构振动的分布作为边值问题来计算声场。这种计算方法对空气声学来说,由于空气是十分轻的流体介质,介质密度很小,其声阻抗 ρc 只是金属的万分之几量级,所以它对结构体振动的影响可以忽略不计,计算结果与实际情况是符合的。空气中的结构振动如同其在真空中一样。但对于水下结构声来说,所得结果具有较大差别,严格来说是不正确的。这是因为和金属相比,水属于密介质,其声阻抗 ρc 只比金属结构的阻抗小一个数量级。这时水介质对结构,特别是薄板和薄壳的振动产生重要影响,因此水中结构的振动必须计及水介质负荷。因此,水下结构声问题必须把弹性结构振动和声场辐射问题作为结构与声的一个耦合系统统一起来进行分析,不能分割开来处理。近代,由于电子计算机的飞速发展,人们可以把振动与声耦合系统统一起来进行分析,对表征振动与声耦合问题的微积分方程进行求解。另外,针对不规则复杂结构等更为一般的弹性结构的振动与声辐射/散射的近似解法和数值求解技术也日趋成熟,下面进行简要介绍。

1.3.1 解析法

20 世纪五六十年代,计算机的计算速度和计算能力很差,无法对不规则复杂结构的振动与声场特性进行预报,只能利用解析法对声场进行计算。

1. Kirchhoff 积分方程法^[49]

Kirchhoff 积分方程又称为惠更斯积分或格林公式,它给出了空间区域任意点的声场势函数与给定面上的速度势 $\Phi_s(\mathbf{r}_s)$ 和它的法向导数 $\frac{\partial \Phi_s(\mathbf{r}_s)}{\partial n}$ 的关系,Kirchhoff 积分公式为

$$\Phi_s(\mathbf{r}_M) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[\Phi_s(\mathbf{r}_s) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jkr_{sM}}}{r_{sM}} \right) - \frac{e^{-jkr_{sM}}}{r_{sM}} \frac{\partial}{\partial n} \Phi_s(\mathbf{r}_s) \right] ds \quad (1.2)$$

式中, S 为包围散射体的封闭曲面, n 为 S 的外法线, $\mathbf{r}_M$ 在 S 外,如图 1.2 所示。

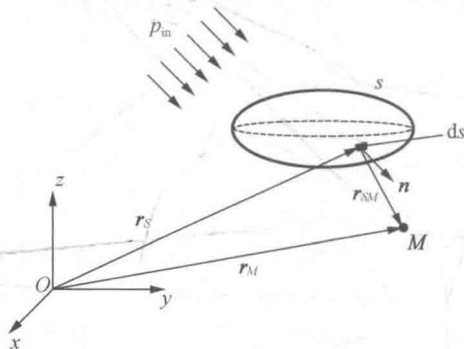


图 1.2 Kirchhoff 积分示意图

Kirchhoff 积分方程在数学上来讲是严格解析解,可应用于任意形状目标。但是在利用 Kirchhoff 积分方程法计算实际声场时,困难在于往往只能知道 $\Phi_s(\mathbf{r}_s)$ 和 $\frac{\partial \Phi_s(\mathbf{r}_s)}{\partial n}$ 两者之一的值,所以 Kirchhoff 积分公式实际上是个积分方程,基于 Kirchhoff 积分方程有一系列的近似解析方法以及数值计算方法。当表面是平面这种特殊情况,表面只给出 $\Phi_s(\mathbf{r}_s)$ 或 $\frac{\partial \Phi_s(\mathbf{r}_s)}{\partial n}$ 两者之一时,可以用 Kirchhoff 积分方程导出惠更斯第一和第二积分公式,此时可以直接求得声场的速度势函数。

2. 分离变量法^[49,50]

分离变量法是一种经典的求解散射问题的方法,在解析法中被广泛推广。分离变量法根据求解目标的几何形状以及选取的坐标系,将入射声波和散射声波展开成与目标几何形状以及选取的坐标系相吻合的基本波函数的级数形式,然后根据表面处应力连续和法向振速连续的边界条件确定散射声场级数形式解的待定系数,从而得到声场的解析解。可见,分离变量法要求散射体表面为相对简单规则的曲面,所谓“规则”曲面是指正交曲线坐标系可以描述的曲面,目前已知可对亥姆霍兹方程分离变数求解的正交曲线坐标系只有 11 种,即对平板、柱、球、长椭球、扁椭球等形状的目标可用分离变数求解其散射声场。分离变量法得到的声场解的形式是个无穷级数,当目标的波数尺寸较大时,级数的收敛会恶化,同时, Rayleigh 简正级数解不利于物理机理分析,不能解释目标回波的结构。

3. 物理声学方法^[51,52]

在利用 Kirchhoff 积分方程法计算实际声场时,困难在于往往仅知道速度势 $\Phi_s(\mathbf{r}_s)$ 和它的法向导数 $\frac{\partial \Phi_s(\mathbf{r}_s)}{\partial n}$ 两者之一的值,这样, Kirchhoff 积分公式实际上是个积分方程,而求解积分方程非常困难。对于无限大平面可由惠更斯积分公式得出简单的解析解。假如只给出有限平面上的振速或曲面上的振速,在一定的假设下可以使用物理声学方法来近似计算。物理声学方法做如下假设:和声波波长相比,目标表面尺寸很大,此时可以忽略几何影区的衍射对总声场的影响;当目标的曲率半径远大于声波波长,此时认为目标表面小范围区域内散射声(或辐射声)的声压和质点振速同相,其比值为平面波波阻抗。这样 Kirchhoff 积分方程便可以简化,简化体现在两个方面,一方面是积分面积的减小,另一方面是将积分方程化为一个普通的面积分。可见,物理声学方法本质上是 Kirchhoff 积分方程方法的高频远场近似。

4. 蠕波分析法^[49,53]

利用分离变量法得到的 Rayleigh 简正级数解是一个无穷级数,在增大目标的波数尺寸时,级数的收敛性迅速恶化。另外, Rayleigh 简正级数解还有着许多重大的不足之处,其主要的缺点在于,若不通过数值计算结果,级数不可能进行解析方法的研究。为了表示关于声

场的分布结构,需对不同参数情况进行一系列计算。同时用级数表示的解析方法及其数值计算结果很难区分不同类型的反射波和绕射波,难以进行物理机理分析。对 Rayleigh 简正级数解进行 Sommerfeld - Watson 变换可得解的另外一种表达式,此形式中的每一项可理解为一沿散射体表面绕行(蠕动、爬行)的波,再从表面脱离传播到接收点。同时对声场贡献较大的波的类型有限,级数的收敛性和 Rayleigh 简正级数解相比变得更好。

5. 几何衍射理论(GTD)^[54]

几何衍射理论(GTD)能够解决很多异形物体的散射问题以及用数值计算解散射和衍射问题。这种理论最初是用来解决物体电磁散射而提出的,其理论基础为蠕波分析法的相关理论研究结果,例如,把声波在无限平界面上的反射和折射以及沿圆柱导体表面的爬行波的渐近式,用来解决从点源发出的球面波或线源发出的柱面波在凸界面上的反射和折射以及沿凸表面的爬行等问题。Philip L. Marston 借鉴了电磁散射理论中的 GTD 理论,成功地计算了水下弹性体回波中弹性波成分,其基本思想为:弹性体散射被认为是入射声波激励出弹性体中的弹性波,在弹性体表面传播的弹性波(各种类型的表面波)在传播过程中不断向水中再辐射(折射、漏出)声波,此再辐射(折射、漏出)声波就为弹性体的弹性声波。该方法,公式简单,物理意义清晰,便于声呐目标回波建模。

6. 亮点模型^[55]

亮点模型方法是在蠕波理论和几何衍射理论的基础上发展起来的一种回波结构的综合方法,其基本思想是:将大型复杂目标分解为若干类子目标,对每个子目标的回声用一个亮点模型来描述。此处的亮点具有比较广泛的含义,包括真实的亮点和等效的亮点,比如,镜反射波亮点是真实的亮点,环绕波亮点是等效的亮点,单个亮点由幅度反射因子 A_i 、相对时延因子 τ_i 和相位跳变因子 φ_i ($i=1,2,\dots,N$) 表示,总的回波就是由这些亮点子回波叠加的结果。亮点模型是一种比较适用于工程应用的模型,具有物理概念清楚、计算简单快捷的优点。

7. 共振散射理论(RST)^[53,57,58,59]

散射波与散射体的固有振动特性有关,理论计算和实验均发现弹性体的散射波有共振现象。而共振散射理论(RST)是分析水下弹性体声散射频域特性的基本方法,其基本思想是将弹性体散射声波分解为刚性(或软体)背景项和一些共振形式项。当入射波的频率偏离共振频率时,目标散射声场将接近于背景场,它只依赖于目标的几何特性。但是,当频率接近某个共振频率时,相应的共振模式将被激发并起到重要作用,在形态函数或共振谱中表现为一窄的共振峰,因此散射的形态函数包含许多共振谱。

8. 奇异点展开法(SEM)^[53,56]

奇异点展开法(SEM)是在电磁散射理论中发展起来的,应用所有的奇异点(包括极点、分支点、本性奇点和无限远奇点)来描述散射场。已经证明,对应于共振模式的极点对散射远场有最重要的贡献,应用 Mittag - Leffler 定理,散射声场可以展开成复频率平面上一个整