

MEMS矢量水听器及其应用

张国军 著



科学出版社

MEMS 矢量水听器及其应用

张国军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

水听器作为声呐系统的核心部件,直接影响到声呐的性能。20 世纪晚期出现的矢量水听器可以同步共点地获得声场的声压和振速等信息,单只水听器即可解决水下声目标线阵声呐左右舷模糊的难题,因而成为当前水下换能器领域发展的重要方向。20 世纪 70 年代发展起来的 MEMS 技术因具有“3 微”的特点,在传感器领域得以迅猛发展,并逐年提高其市场占有率,然而将 MEMS 技术应用于水听器在国内外尚不多见。本书系统地论述 MEMS 矢量水听器的工作原理、微结构设计仿真、器件加工、系统集成及声学性能测试等内容,最后对 MEMS 矢量水听器及其声电换能微结构的应用前景进行简要阐释,并给出工程上应用的实例。

本书是关于矢量水听器及其工程应用的专业书籍,可供水声工程和 MEMS 传感器领域的广大科技人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业高年级本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 矢量水听器及其应用/张国军著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052867-4

I. ①M… II. ①张… III. ①矢量—水听器—研究
IV. ①TB565

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 111934 号

责任编辑:赵艳春 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:176 400

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

水听器又称水下传声器 (hydrophone), 是把水下声信号转换为电信号的换能器。水听器作为声呐系统的核心部件, 直接影响到声呐系统性能的优劣, 水听器是水声学的一个重要研究方向, 新型水听器的研究是海军声呐技术发展的一项关键内容。当前水听器根据作用原理可分为标量水听器和矢量水听器。矢量水听器是 20 世纪晚期出现的一种新型水下声传感器, 可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息, 为后续的信号处理提供更加丰富的信息, 可大幅提高水声系统的性能。它同时具有良好的低频指向性、抑制各向同性噪声等诸多优点, 为解决水声工程中的许多问题提供了新的思路和方法。然而当前的矢量水听器存在体积较大、工程应用安装复杂以及成本较高等问题。微机电系统 (MEMS) 是以半导体制造技术为基础发展起来的, 其显著优点是体积小、重量轻、功耗低、价格低廉、性能稳定等。MEMS 自 20 世纪 80 年代中后期崛起以来发展极其迅速, 被认为是继微电子之后又一个对国民经济和军事具有重大影响的技术领域, 并将成为 21 世纪新的国民经济增长点和提高军事能力的重要技术途径。在此背景下, 作者提出将 MEMS 技术应用于矢量水听器的设想, 以解决当前矢量水听器存在的问题。

MEMS 矢量水听器是基于 MEMS 技术和仿人耳蜗听觉原理设计加工而成的微型矢量水听器, 与当前其他矢量水听器相比, 具有体积小、矢量性、批量化、低成本、刚性安装等优势, 具有良好的潜在应用前景。本书结合作者近十年的 MEMS 矢量水听器研究工作经历, 系统地阐释了 MEMS 矢量水听器的工作原理, 声电换能微结构设计、计算仿真, MEMS 器件工艺加工, 系统封装集成及声学性能测试等内容, 并给出一些初步的工程应用实例。本书内容新颖、系统性强, 是我国第一部将自主设计、加工、集成的 MEMS 器件应用于水声领域的书籍, 将 MEMS 新兴技术应用于传统的水声换能器领域, 促进了多学科间交叉融合发展。本书的部分研究成果是在多项国家和省部级课题资助下取得的。

本书是在中北大学张文栋教授、薛晨阳教授、熊继军教授、刘俊教授等, 以及哈尔滨工程大学杨士莪院士的关心和支持下完成的, 在此一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免有不足之处, 敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

前言

第 1 章	概述	1
1.1	声学常见名词和物理量	3
1.2	矢量水听器国内外研究进展及应用现状	8
1.3	MEMS 技术应用于矢量水听器	17
第 2 章	MEMS 矢量水听器微结构设计及仿真	18
2.1	纤毛式 MEMS 矢量水听器仿生微结构工作原理	19
2.2	纤毛式 MEMS 矢量水听器十字梁微结构力学建模	21
2.2.1	MEMS 矢量水听器微结构的力学特性分析	22
2.2.2	MEMS 矢量水听器微结构的频率特性分析	26
2.3	微结构应力集中方案设计	28
2.3.1	多重应力集中方法及其应用于十字梁微结构	29
2.3.2	应力集中区域选择及尺寸设计	33
2.3.3	MSCR 对十字梁微结构性能的提高	35
2.4	纤毛集成低密度小球技术	44
第 3 章	纤毛式 MEMS 矢量水听器微结构加工集成	46
3.1	部分关键工艺设计	47
3.1.1	多重应力集中区凹槽刻蚀	47
3.1.2	压敏电阻条设计	48
3.1.3	欧姆接触及金属互连线设计	51
3.1.4	体硅刻蚀工艺设计	52
3.2	十字梁微结构 MEMS 加工工艺流程设计	53
3.3	十字梁微结构光刻掩膜版图设计	58
3.4	纤毛式 MEMS 矢量水听器芯片一致性测试	61
3.4.1	纤毛式 MEMS 矢量水听器芯片形貌测试	61
3.4.2	纤毛式 MEMS 矢量水听器压敏电阻一致性测试	64
3.5	纤毛与十字梁微结构集成	65

第 4 章	纤毛式 MEMS 矢量水听器芯片封装集成	67
4.1	纤毛式 MEMS 矢量水听器芯片封装模型的提出	67
4.2	有限元仿真透声帽的声学性能	68
4.2.1	固定约束对透声帽透声性能影响的仿真	68
4.2.2	不同几何尺寸的透声帽透声性能仿真	73
4.2.3	桔瓣式封装结构提出及有限元建模仿真	74
4.2.4	不同材质的透声帽透声性能仿真	78
4.3	微型导流罩设计	79
4.4	低噪声信号提取电路设计	81
4.5	纤毛式 MEMS 矢量水听器组装集成	84
4.5.1	纤毛式 MEMS 矢量水听器芯片隔振支座研制	85
4.5.2	纤毛式 MEMS 矢量水听器封装集成流程	87
第 5 章	纤毛式 MEMS 矢量水听器室内性能测试	89
5.1	灵敏度测试	89
5.1.1	纤毛式 MEMS 矢量水听器裸芯片灵敏度测试	91
5.1.2	纤毛式 MEMS 矢量水听器透声帽封装后灵敏度测试	94
5.2	指向性测试	95
5.3	纤毛式 MEMS 矢量水听器量程测量	98
5.4	纤毛式 MEMS 矢量水听器抗振动性能测试	100
第 6 章	纤毛式 MEMS 矢量水听器湖、海试性能测试	102
6.1	微型导流罩流激噪声抑制能力测试	102
6.1.1	不同材料的微型导流罩对纤毛式 MEMS 矢量水听器性能的影响	102
6.1.2	典型使用环境下微型导流罩抑制流激噪声能力测试	104
6.2	纤毛式 MEMS 矢量水听器新安江湖试	109
6.2.1	灵敏度测试	111
6.2.2	指向性测试	113
6.3	纤毛式 MEMS 矢量水听器海试	114
第 7 章	MEMS 矢量水听器及其纤毛仿生微结构工程应用初步	118
7.1	MEMS 矢量水听器在水雷兵器上的应用	118
7.2	MEMS 矢量水听器在海底观测网上的初步应用	119
7.3	纤毛式 MEMS 仿生微结构应用于水下湍流检测	122
7.4	电子心音器	130
参考文献		134

第1章 概述

根据《联合国海洋法公约》的规定,我国所属的海域面积约为 300 万平方千米,海岸线长度为 1.8 万千米。但是,在这些海域内有 120 万平方千米左右的区域与海上邻国存在争议和矛盾,我国的海洋权益正受到日益严峻的挑战和侵犯。国家经济和社会发展“十二五”规划中提出的“坚持陆海统筹,制定和实施海洋发展战略,提高海洋开发、控制、综合管理能力”正是在这样的背景需求下做出的一项重大战略决策^[1]。我国要赶上世界发展的潮流,有效地维护国家海洋权益和领土完整,就必须全面实施海洋开发战略,建设海上强国。

维护海洋权益必须依靠国家综合实力,建设强大海军。水下战场作为现代化战场的重要组成部分,正面临着信息化的冲击,如何取得制海权,先发制人是各军事强国所追求的目标。潜艇因具有机动灵活、隐蔽性好、突击力强等优点,被称作“水下杀手”,被认为是海军实力的象征。为提高潜艇的突防等综合作战能力,各大海军强国将提高声隐身性能作为潜艇设计中首要考虑的因素。美国早在 20 世纪 70 年代就研制出了 G.P.Lipscomp 安静型潜艇。在 20 世纪 90 年代中期建造的 SSN-21(海浪级)核潜艇,其综合噪声水平达到了 90~100dB,这一量级已经低于海洋背景噪声^[2]。俄罗斯设计制造的安静型 Kilo(基洛)级潜艇,其静音效果非常突出,有“海底之洞”之称。总体上,20 世纪 50 年代以来,潜艇的目标强度由于消声瓦和吸收材料的使用降低了大约 10dB,潜艇的辐射噪声级也降低了 35~40dB^[3,4]。2009 年 2 月法国“凯旋”号核潜艇和英国“先锋”号核潜艇在大西洋水下相撞,这从另外一个侧面反映出两国核潜艇在低速航行时噪声辐射已经低至难以检测的水平。

要想在水下战场准确掌握敌方潜艇的动向就必须有良好的声呐设备。而潜艇减振降噪声隐身技术的发展和潜艇检测距离与定位精度要求的不断提高,都增加了声呐探潜、反潜的难度。当前,对低速安静型潜艇被动探测距离准确维持在 5 千米,主动探测距离准确维持在 50 千米,已是各国海军追求的目标^[5]。

良好的声呐系统离不开性能优异的水听器,声呐主要是通过一个或多个水听器将接收到的声目标信号转换为电信号,经过放大以电压形式输出。所以,水听器的质量和性能优劣将直接影响到系统的精度以及能否反映被测目标的全部信息。矢量水听器的研制正是在这种不断进步的技术需求推动下逐步发展起来的。矢量水听器可以同时测量声场中的声压标量和质点振速等矢量信息,因而获得的

声场信息更加全面。而且单个矢量水听器能获取一定的空间处理增益,因为在各向同性的背景环境噪声场中,由于矢量水听器具有空间指向性,可以抵消部分背景噪声的干扰,而目标的辐射噪声因具有特定的传播方向而不会被抵消。对于传统的压电声压标量水听器,由于不具备空间指向性,不能获得附加空间增益所以从理论上分析,基于矢量水听器的声呐系统将比基于传统声压水听器的声呐系统探测距离更远,定位精度更高^[6-10]。

另外,微小型矢量水听器还可以用于水下无人潜器(unmanned underwater vehicle, UUV)、智能动力水雷、空投声呐浮标、深水炸弹等水下小尺寸武器平台。在传统的火箭助力锚雷上装备微型矢量水听器,不仅可以探测声目标的有无,还可以确定其方位,然后指挥雷体向着目标方向移动,可增强水雷的毁伤效果^[11]。除军事用途外,在捕鱼等民用方面,人们研制出基于矢量水听器的渔探仪,可以利用矢量水听器来接收鱼群的回波信号,确定鱼群的方位以及鱼群的大小、密集度甚至种类,这对渔民捕鱼非常有利^[12,13]。

随着舰船减振降噪技术的发展,传统的声呐探测技术受到前所未有的挑战,各主要海军国家纷纷探索基于新效应、新原理、新工艺的新型换能器进行水下声目标检测。目前,水下目标检测手段主要是利用声压标量水听器及其阵列来实现,这时只能获得声场的声压标量信息,不能获得水质点的振速、加速度等声场的矢量信息。另外,对于小尺寸水下武器平台(如水雷、深水炸弹等),由于自身空间的限制,声压水听器阵在低频段很难获得有效阵增益和波束宽度,继而影响到其探测距离与定位精度。然而,近年发展起来的矢量水听器可借助单个水听器或较小的阵列实现水下声目标甚低频、远距离探测与定位,因而备受国内外学者的关注。矢量水听器的出现极大地丰富了水声学科的内容,矢量水听器可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息,为后续的信号处理提供更加丰富的信息,可大幅提高水声系统的性能。它同时具有良好的低频指向性、抑制各向同性噪声等诸多优点,为解决水声工程中的许多问题提供了新的思路和方法。矢量水听器及应用技术被称为水声学科的一个标志性进步领域,已成为 21 世纪我国水声技术最具有发展前景的方向之一。矢量水听器按拾振工作原理主要分为同振式、声压梯度式、动圈式等,虽然它们各自的工作原理不相同,但有对于声信号的检测具有“8”字形余弦指向性的共同特点。微机电系统(micro elector mechanical system, MEMS)矢量水听器是基于 MEMS 技术实现的矢量水听器,是近年来新发展起来的一款微型水听器,可以说是矢量水听器的新秀,相对于其他矢量水听器具有体积小、成本低、刚性安装等优势,非常适合应用于水下小尺寸武器平台。本书以研究 MEMS 矢量水听器为目标,介绍 MEMS 矢量水听器的工作原理、相关关键技术及其初步应用,希望起到抛砖引玉的作用,引起该领域学者的关注,共同促进 MEMS 水听器的发展。

1.1 声学常见名词和物理量

声学是物理学的一个分支,是一门古老的学科,也是一门发展着的学科。声学是研究声音的产生、传播、接收及声学现象的发生和处理的学科。水声学科是声学的一个分支,重点研究声波在水介质中的发生、传播和接收现象,现在已成为人们了解海洋、开发海洋、开展海洋研究的主要工具。

介质质点的机械运动由近及远地传播就称为声振动的传播或声波,可见声波是一种机械波,它的传播与介质本身的性质有关,当声振动在流体中传播时,形成介质的压缩和伸张交替运动,声波表现为压缩波的形式传播,且声振动传播的方向与质点振动方向一致,即纵波。固体中由于切应力的存在,还有横波的传播形式。介质中振动传播过程有时间滞后,即声波在介质中传播有一定的速度,称为声波的传播速度,简称声速。声波所涉及的区域统称声场。连续介质中,声场中任意一点的运动状态可用压强、介质密度和介质振动速度来表示。在理想流体介质中,由于没有切应力,压强是一个标量函数。设介质中某一体积元没有扰动时静压强为 $P_0(x, y, z, t)$, 声波传到该体积元后压强变为 $P(x, y, z, t)$, 则声波所引起的压强变化量 $p(x, y, z, t) = P(x, y, z, t) - P_0(x, y, z, t)$ 称为声压。声压的大小反映了声波的强弱,是描述声波的最基本物理量。此外,既然声波是介质质点振动的传播,那么介质质点振动的速度自然也是描述声波的物理量之一。但是,声场中介质的振动速度随时间而变,同时各处振速的方向也不同,即振速分布是个矢量场,这与声压是个标量不同。由于声压的测量比较容易实现,通过声压的测量也可以间接求得质点振速等其他物理量。

在国际标准单位制中,声压的单位是 Pa (帕), $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$; 振速的单位是 m/s 或者 cm/s。

声振动作为一个宏观的物理现象,必然要满足三个基本的物理定律,即牛顿第二定律、质量守恒定律及描述压强、温度与体积等状态参数关系的物态方程,

即声学中的三大方程(一维理想流体介质): 运动方程 $\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$, 连续性方程

$-\rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$, 物态方程 $c_0^2 = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_s$ 。其中,运动方程描述了声场中声压 p 与质点

振速 v 之间的关系;连续性方程描述了介质质点振速 v 与密度 ρ 之间的关系;物态方程描述了声场中压强 P 与密度 ρ 之间的变化关系。声波传到原先静止的介质中,一方面使介质质点在平衡位置附近来回振动,另一方面在介质中产生了压缩和膨胀的过程,前者使介质具有了振动动能,后者使介质具有了形变位能,两部

分之和就是由于声振动使介质得到的声能量,这种由于声波传播而引起的介质能量的变化称为声能。声波扰动传走,声能也跟着转移,因此可以说声波的过程实质就是声振动能量的传播过程。在单位时间内,通过与能量传播方向垂直的单位面积的声能为声能流密度,显然声能流密度也是一个矢量。

声能流密度为

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\rho_0 v^2 + \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \right)$$

如果对一个简谐振动,可以取一个周期内的平均声能流密度

$$\bar{\varepsilon} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0^2}$$

其中, $p_e = \frac{p}{\sqrt{2}}$ 。

1. 声压级

声压级以符号 SPL 表示,其定义为

$$\text{SPL} = 20 \lg \frac{p_e}{p_{\text{ref}}}$$

在水中, p_{ref} 一般取 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。一声音比另一声音大 1 倍时大 6dB,人耳对声音强弱的分辨能力约为 0.5dB。

2. 平面波

离声源距离远处,沿波的传播方向取一局部范围来看,在这个范围内的波面都是平行的,这样的波可近似看成平面声波。平面声波在均匀的理想媒质中传播时,声压幅值、质点速度幅值都是不随距离改变的常数,也就是声波在传播过程中不会有任何衰减。声传播过程中不会发生能量的耗损;同时平面声波传播时波阵面不会扩大,因而能量也不会随距离增加而分散。平面声场中任何位置处声压和质点速度都是同相位的。

3. 球面波

球面波是指波阵面为同心球面的波。设想在无限均匀媒质中有一球状声源,其表面迅速地膨胀和收缩,且表面上的各点做同相位同振幅的振动,向周围媒质辐射的波就是球面波。这种声波是球对称的,即声压的大小仅与离球心的距离有关。任何形状的声源,只要它的尺寸比波长小得多都可以看作点声源,辐射球面波。对于球面波,在离声源任意距离上的声强与距离的平方成反比,声压与距离

成反比，声压与振动速度之间的相位差与球面波的半径对波长的比值成反比。辐射球面波时媒质的声阻抗率是复数，它具有纯阻和纯抗两部分，并与半径和波长有关。当球面波半径很大时，纯抗分量可以忽略。

4. 声源级

声源级以符号 SL 表示，其定义为在声轴上距声源 1m 处声压与参考声压之比的分贝数，即

$$SL = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}}$$

5. 传播损失

传播损失以符号 TL 表示，由几何扩展损失和介质吸收损失两者构成，其定义为

$$TL = 10K \lg r + ar \quad (a \text{ 的单位: dB/m, } r \text{ 的单位: m})$$

当 $K=2$ 时为球面扩展损失， $K=1$ 时为柱面扩展； a 为海水吸收系数，与频率 f 有关，在 10kHz 以下的经验公式为

$$a = 0.007f^2 + \frac{0.263f^2}{2.9 + f^2} \quad (\text{dB/km})$$

6. 声阻抗率

声阻抗率定义为声场中某位置的声压与该位置的质点速度的比值，即

$$z = \frac{p}{v}$$

声场中某位置的声阻抗率通常是复数，像电阻抗一样，其实数部分反映的是能量的损耗。在理想媒质中，实数的声阻抗率也具有“损耗”的意思，不过它代表的不是声能转化为热能，而是代表能量从一处向另一处转移，即“传播损耗”。

对于平面波，可求得平面前进波的声阻抗率为

$$z = \rho_0 c_0$$

对于沿 $-X$ 方向传播的反射波情形，可求得

$$z = -\rho_0 c_0$$

由此可以看出，在平面声场中，各位置的声阻抗率数值上都相等，且为一个实数。这反映了在平面声场中各位置上都无能量存储，在前一个位置上的能量可

以完全地传播到后一个位置上。注意到乘积 $\rho_0 c_0$ 为媒质的固有常数, 所以称 $\rho_0 c_0$ 为媒质的特性阻抗, 单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

7. 等效本底噪声声压级

设有一正弦声波入射到水听器上, 从而此电压输出的有效值等于水听器自噪声在 1Hz 带宽上的均方根电压值, 则入射声压的有效值称为等效噪声声压。水听器等效噪声声压在数值上等于自噪声在 1Hz 带宽上的均方根电压值与水听器的灵敏度比值。等效噪声声压反映的是水听器能够测得的最小声信号的大小。等效噪声声压对 $1\mu\text{Pa}$ 基准声压取以 10 为底的对数再乘以 20, 所得的分贝数称作水听器的等效噪声声压级^[14]。

8. 动态范围

动态范围是水听器能够做出线性响应的最大声压级与最小声压级之差, 通常最小声压级由水听器的等效本底噪声声压级替代。

9. 频程

频程是两个声信号的频率间的距离, 它以高频与低频的频率比的对数来表示。此对数通常以 2 为底, 单位称为倍频程 (Oct)。此对数也可以 10 为底, 此时单位称为十倍程 (decade)。

10. 矢量水听器

能测量介质质点运动的矢量信号, 如位移、振速、振动加速度的装置均称为矢量传感器, 而用于水下声信号测量的这类传感器通常为矢量水听器。单个矢量水听器便可实现对声目标的定向。作为水听器的一种, 表征水听器的基本参数, 如灵敏度、工作频带等, 对矢量水听器也均是适用的。但由于矢量水听器的特殊性, 表征其性能的参数也有其特殊性。矢量水听器的基本参数还包括各通道的指向性, 各通道的灵敏度, x 、 y 、 z 通道之间的相位差特性等, 下面给出表征每一个正交通道的两个重要特性参数^[15]。

1) 指向性

理论上在矢量水听器几何尺寸远小于声波波长时指向性与频率无关, 这就是通常所说的矢量水听器与声波频率无关的指向性图。一般情况下, 波长尺寸很小的矢量水听器就能得到 8 字形指向性图, 理想情况下的指向性如图 1-1 所示。

在实际研制过程中, 由于装配工艺或材料不均匀性, 总是不能得到理想的 8 字形指向性, 所以通常采用以下参数来评价矢量水听器指向性图的优劣。

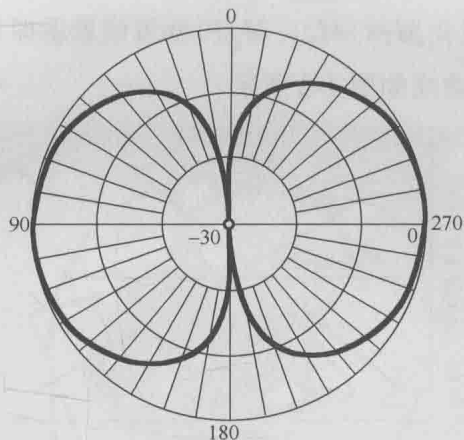


图 1-1 8 字形余弦指向性

(1) 指向性分辨率

$$K_d = 20 \lg \frac{G_0}{G_{\pm 90}} \quad (\text{dB})$$

其中, G_0 为 0° 或者 180° 方向上的灵敏度最大值; $G_{\pm 90}$ 表示在 $+90^\circ$ 或者 -90° 方向上的灵敏度最小值。矢量水听器通常对指向性分辨率的要求是大于 30dB。

(2) 轴向灵敏度不对称性

$$K_{\Delta \max} = 20 \lg \frac{G_0}{G_{180}} \quad (\text{dB})$$

定义为在 0° 方向上的灵敏度 G_0 与 180° 方向上的灵敏度 G_{180} 的比值。矢量水听器通常对轴向灵敏度不对称性的要求是小于 1dB。

2) 通道灵敏度

矢量水听器的输出电压与它所在处的介质质点振速 (或位移或加速度) 矢量成正比, 矢量水听器除了响应声场中的声压梯度和矢量信号外, 还对所处的声压有响应, 因此可用声压灵敏度来表达。

声压灵敏度 M_p 、振速灵敏度 M_v 、加速度灵敏度 M_a 和位移灵敏度 M_ξ 之间的关系为

$$M_p = \frac{1}{\rho c} M_v = \frac{\omega}{\rho c} M_a = \frac{1}{\omega \rho c} M_\xi$$

由上式可以看出, 矢量水听器的振速灵敏度 (M_v) 是声压灵敏度 (M_p) 与平面波声场的特性阻抗 (ρc) 的乘积, 所以两者的频率响应曲线形状相同; 矢量水听器的声压灵敏度、位移灵敏度、加速度灵敏度与其频率有关。

上式中的灵敏度 M_p 、 M_v 、 M_a 、 M_ξ 用分贝值表示即为矢量水听器的灵敏度级，它们定性的灵敏度曲线如图 1-2 所示。

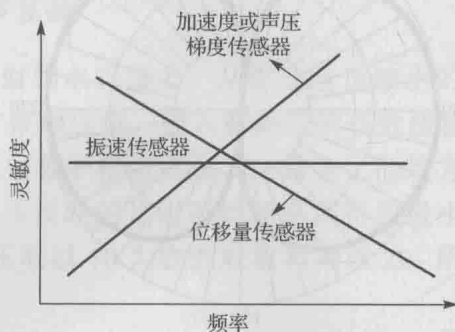


图 1-2 矢量水听器灵敏度的不同表示方法

1.2 矢量水听器国内外研究进展及应用现状

在国外，有关矢量水听器的研究工作最早始于 20 世纪 40 年代的美国。1956 年，美国学者 Leslie 等在 *JASA* 上发表了 *Hydrophone for measuring particle velocity* 的经典论文^[16]，在这篇论文中作者详细推导了刚性、密度均匀球体在水下声场中运动的数学表达式，文中还提出了在球体中安装水听器实现对水质点振速的测量的方法。之后相继在苏联、英国、日本、法国逐步开展了矢量水听器方面的研究工作，如在 1974 年，苏联学者 Zakharov 等发表论文，利用其研制成功的矢量水听器（复合式水听器）开展海洋环境噪声研究^[17]。但是，矢量水听器技术研究热潮直至 20 世纪 90 年代才逐渐兴起。1991 年，*JASA* 期刊第 89 卷和第 90 卷连续刊出 3 篇美、俄两国学者有关矢量水听器方面的研究论文^[18-20]。1995 年，在美国海军研究局的资助下，美国声学学会举行了声矢量传感器专题研讨会，之后 *JASA* 期刊出版了 *Acoustic Particle Velocity Sensor: Design, Performance and Applications* 论文集，到目前为止，这本论文集仍是该领域最有价值的参考资料^[21]。2002 年，IEEE 的 *Oceans* 期刊设立了“声质点振速传感器”专题，涉及不同频段声矢量传感器的设计、制作和试验等多方面内容，这些都反映了当时最新的研究情况^[22]。

1941 年，美国 Kendan 等成功研制了第一只质点振速矢量水听器 SV-1（图 1-3 左）^[23]，该矢量水听器为一维同振型声压梯度水听器，工作频率范围为 70~7000Hz，主要用于音频范围换能器校准。1955 年，他们又研制了球形质点振速矢量水听器 SV-2（图 1-3 右），该矢量水听器工作频带侧重于低频为 15~700Hz，主要用于研究湖底甚低频声学特征。以 SV-1、SV-2 为基础，美国成功研制出了型号

为 AN/SSQ-53 的无线电声呐浮标系统, 之后又陆续研制出其改进型 AN/SSQ-62 和 AN/SSQ-77B (图 1-4)。

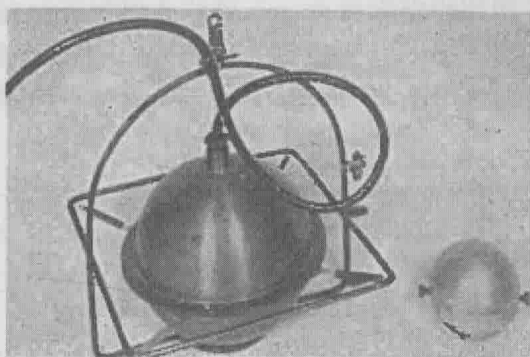


图 1-3 质点振速水听器 SV-1 (左) 和 SV-2 (右)



图 1-4 美国 AN/SSQ 系列声呐浮标

据美国专利 U.S.No2856594 和 U.S.No4179682 称, 美国的 SURTASS 拖曳线阵中应用了矢量水听器, 并成功解决了左右舷模糊问题^[24]。2007 年, 美国专利 U.S.No20070195648 和 U.S.No7167413 报道, 将声压阵与矢量阵组合在一起, 构成拖曳线阵^[25,26] (图 1-5)。而在噪声测量方面, 美国 Scripps 海洋技术研究所研制出了两套矢量水听器甚低频噪声测量系统, 即 Swallow 浮标和准垂直 DIFAR 行列阵, Swallow 浮标由 8 个阵元组成基阵, 阵元等间距 150m 垂直布放, 工作深度为 400~1300m, 工作频带为 0.6~20Hz。测试结果表明, 该系统对于舰船辐射噪声的次声频段声强信噪比的增益比声压标量测量高 3~6dB^[18,27]。

与此同时, 受美国海军委托, Wilcoxon 公司为其专门研制外形和尺寸适用于现有拖曳阵的小型三维矢量水听器 TV-001, 如图 1-6 所示^[28,29]。该三维矢量水听器采用 PZT-PT 压电单晶材料制成, 振速矢量通道由加速度计构成。其声压

标量通道和振速矢量通道声压灵敏度分别是 -193dB 和 -174dB ，工作频带为 $3\sim 7000\text{Hz}$ 。

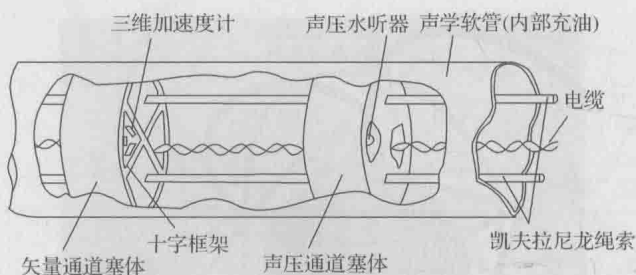


图 1-5 美国矢量水听器三元拖曳线阵结构图

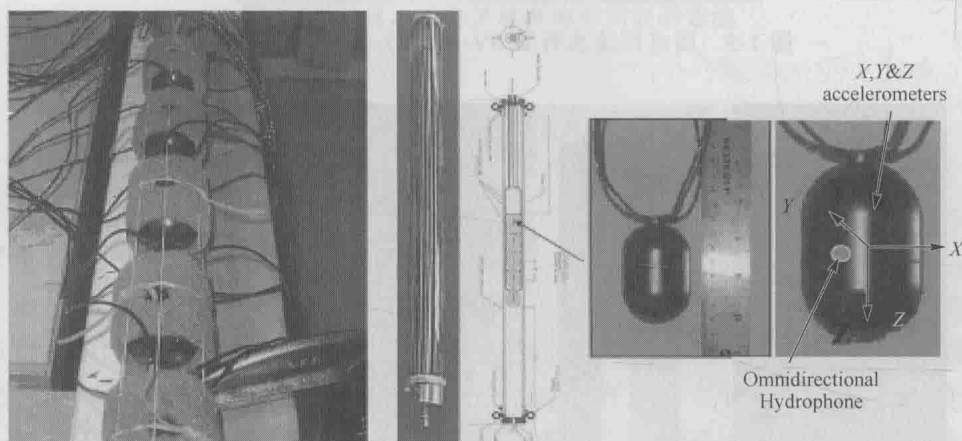


图 1-6 Wilcoxon 公司研制的水听器 TV-001 以及利用该水听器组成的线阵

另外，美国海军研制出了基于矢量水听器的水下警戒声呐系统，可在港口和航道附近布放，极大地增强了港口和航道安全性^[30,31]。根据文献[32]，美国还开展了利用矢量水听器阵测量潜艇辐射噪声方面的研究工作，但由于保密等原因具体研究内容、结果不详。除此之外，美国的雷声公司、Bell 公司等均有矢量水听器信号处理应用集成器件产品，这些产品包括舷侧阵、共形阵、拖曳阵、区域警戒系统及鱼雷报警声呐等，大力推动了美国将矢量水听器用于水声远程探测声呐方面的研究工作。

尽管美国最早提出了基于惯性传感器的矢量水听器的设计思想，并研制出质点振速水听器样机，但在 Rzhevkin 和 Zakharov 的积极倡议和推动下，苏联在矢量水听器研制方面发展迅速，并且无论矢量水听器的基础研究还是应用研究都走在世界前列，该技术还被誉为俄罗斯 20 世纪十大水声技术之一。1989 年苏联学者出版了 *Vector-phase Method in Acoustics* 专著，该专著是世界上第一部有关声矢

量传感器技术的专著^[33],较详细地论述了声矢量传感器的工作原理和应用。苏联科学院远东分院率先研制出三维同振球形质点振速矢量水听器(图 1-7),该水听器是当时世界上唯一的并在工程上取得了一系列成功应用的矢量水听器。大量的研究结果表明,声强的信噪比与单声压水听器相比,可以提高 10~20dB,显现了矢量水听器在声目标微弱信号提取上的优越性。图 1-8 为该三维矢量水听器的内部结构示意图。

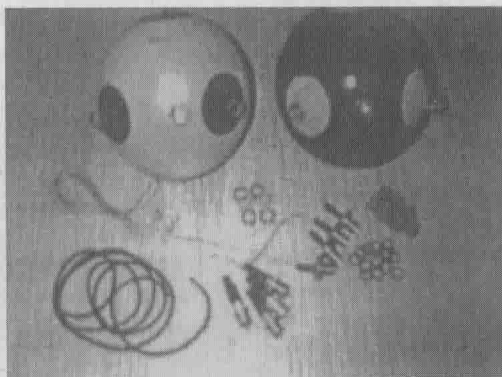


图 1-7 三维同振球形质点振速矢量水听器

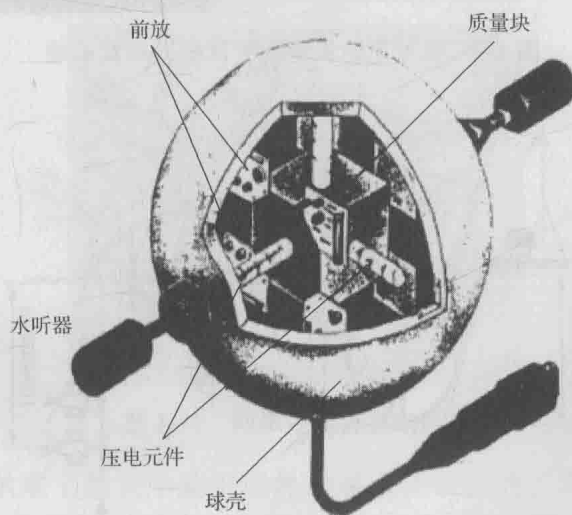


图 1-8 三维矢量水听器的内部结构示意图

苏联于 1983 年研制了基于矢量水听器的低噪声测量系统 CTAC-496,后又研制了性能更好的 ТАИС-8 声呐浮标系统。近年,据有关文献报道,俄罗斯又研制出了基于矢量水听器的潜标式噪声测量系统(图 1-9),并陆续投入试验。俄罗斯科学院远东分院的学者还曾利用声压水听器、矢量水听器组成的浮标系统和坐底