

全面感知水声信息的新传感器技术 ——矢量水听器及其应用

贾志富[†]

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 文章介绍了一种新型水声接收换能器——矢量水听器(矢量传感器),它可以同时共点地测量声场的声压和矢量(水媒质质点振速、振动加速度或声压梯度等),使用矢量水听器比常规声压水听器能获得更全面的声场信息,因此,在水声技术中获得了广泛的应用.文中描述了矢量水听器的结构设计和工作原理及特性,给出了一些重要的应用例子.

关键词 声呐技术,水声接收换能器,矢量传感器,矢量水听器,声场,声强

Novel sensor technology for comprehensive underwater acoustic information——vector hydrophones and their applications

JIA Zhi-Fu[†]

(Underwater Acoustic Institute, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract A novel underwater sound receiver, the vector hydrophone, is described. This hydrophone can synchronously and co-locally measure sound pressure and vectors such as particle velocity, vibration acceleration, and sound pressure gradient, thus acquiring comprehensive acoustic field information. Its structural design, principle of operation, and performance characteristics are reviewed, with several examples illustrating its wide and important practical applications.

Keywords sonar technology, underwater sound receiving transducer, vector sensor, vector hydrophone, acoustic field, acoustic intensity

1 引言

众所周知,声场是一种物理场.追溯声学学科的发展史,直到上世纪下半叶,人们对声场的表述和测量几乎都是以声场的标量(声压)为基础的.事实上,当我们把声场的声压表达式写成泰勒展开的形式并只取展开式的前三项作近似时,则有:

$$P(x, y, z) = P(x_0, y_0, z_0, t) + (r - r_0) \cdot \nabla P(x_0, y_0, z_0) + \frac{1}{2} (r - r_0) \nabla^2 P(x_0, y_0, z_0) \cdot (r - r_0) + \dots, \quad (1)$$

式中右边第一项表示在测量点 $r_0(x_0, y_0, z_0)$ 处的声压值,它可以用无指向性的声压水听器(即零阶水

听器)测得;第二项是在以此点 (x_0, y_0, z_0) 为中心,半径为 r (要满足 $r \ll \lambda$, λ 为声波波长)的小体积元内的声压梯度值,它是矢量,要用声压梯度水听器(即矢量水听器)来测得,而第三项表示在上述小体积元内的二阶声压梯度值,它要用二阶声压梯度水听器(即二阶矢量水听器)测得.从(1)式可以看出,若准确而又全面地描述声场,不仅要知道测点处的标量(声压)值,还需要知道测点处的一阶矢量和二阶矢量值.在平面波声场中,声压梯度与声媒质质点加速度或质点振速有确定的换算关系,测得其中任

2008-12-11 收到

[†] Email: zhifu.jia@gmail.com

何一个值,即可得到另外其他二个值.标量“声压”只表征声场测点处的动态压力的大小,而矢量(声压梯度、质点振速或加速度等)表征了媒质质点在声场作用下以怎样的速度或加速度运动而又朝什么方向运动的,也就是说,声场矢量表征了声波能量流来自何方又朝哪个方向传递着的.这样一来,我们不仅获取了声场的标量信息,又获取了声场的矢量信息,这对洞察声场的时空结构,充实和发展声学理论以及开拓新的声呐检测技术都具有重要的意义.近些年来,有人提出了以声场矢量概念为基本理论并与实验技术相结合的“矢量水声学”的学术观点^[1].

最近30年来,由于材料科学和电子技术以及信息处理技术的飞速发展,促进了用于空气中和水下的矢量传感器的迅猛发展.不同工作原理、不同结构型式的矢量传感器应运而生,至今发展势头方兴未艾.

本文仅扼要介绍水声技术中的矢量水听器的结构形式、工作原理及其基本特性,着重描述最新出现的几种矢量水听器,展现矢量水听器的突出特点,给出几个主要应用例子.

2 矢量水听器结构类型^[1-6]

按水听器敏感元件与声场相互作用的形式可把矢量水听器分为三大类:偶极子型、不动外壳型和同振型.如按敏感元件换能机理的不同,矢量水听器又可分为压电式、动圈式、压阻式和光纤式等等.

2.1 偶极子型

偶极子型矢量水听器是矢量水听器的最原始形式,它可以直接由性能一致的一对点状(所谓“点状”是指其物理尺寸远小于声波波长)声压水听器构成,如图1(a).两个声压水听器之间距 r 小于波长.它们的电输出作串联连接,使得总输出电信号比例于两者所在点之间的声压差.因此这种型式的矢量水听器又称双水听器型或压差型.实际上它是用“有限差分”方法近似求出测点处的声压梯度.经过积分运算后可得到水质点振速.在直角坐标的三个正交轴上,分别放置一对点状声压水听器便构成了三维偶极子型矢量水听器.将一对水听器输出电信号相加并除以2便得到测点的声压值.这种三维结构的偶极子型矢量水听器可同时共点地测量三个正交矢量和一个标量(声压).图1(b)是双水听器型矢量水听器的变型设计^[2].它是将压电陶瓷环的电极(通常作法是内电

极)分割成两等份或四等份(环的外表面涂满电极),经过适当的电极化,使得相对的两个扇形部分的输出电信号作相减处理,便构成了偶极子结构型式的矢量水听器.如果把压电陶瓷环的内电极分割成四等份,通过适当的电极化和适当的电连接方式,又构成可同时测量同平面上的两个正交轴上的声压梯度或振速.本文后面将要介绍的多模式矢量水听器又是图1(b)结构型式的新发展.

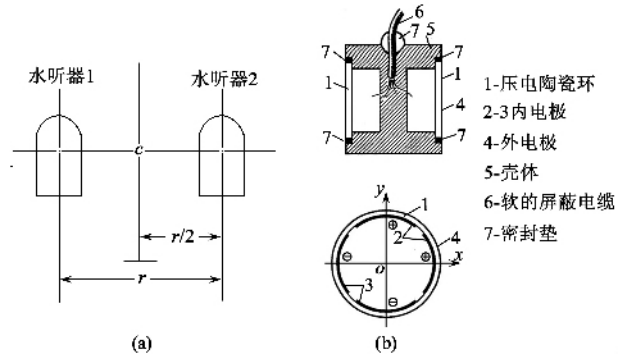


图1 偶极子型矢量水听器结构示意图

2.2 不动外壳型(强迫型)

它是由压电陶瓷圆片(或矩形片)通过一定方式固定于高密度金属壳体上而构成.在声场作用下,外壳对声波呈高机械阻抗,可看作静止不动,而压电片直接受到声场的动态压力(声压)作用,被“强迫”发生形变从而完成声—电转换.实际上,“不动外壳型”仍是一种压差式矢量水听器,水听器的输出电信号幅度依然与压电片两侧的声压之差成比例.为了提高这种矢量水听器的灵敏度,有意在外壳尺寸设计中,增加压电片两侧之间的声路径长度.这种压差式矢量水听器的结构及实物照片如图2所示^[3].

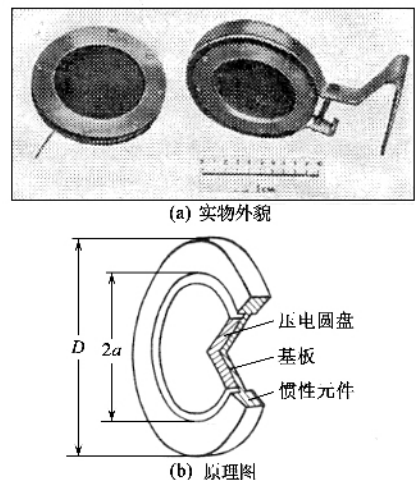


图2 不动外壳型矢量水听器

以上两种结构型式的矢量水听器(图12)在其工作时可以刚性地固定于测量支架上,这也是它们要比下面讨论的“同振型”略胜一筹之处。

2.3 同振型

同振型矢量水听器是将惯性式敏感元件(振动加速度计、速度计等)封装于球形或圆柱形壳内而成。其工作原理是基于刚性球或圆柱体在声场作用下作振荡运动的特性。声学理论早已证明,当刚性球体或圆柱体的波尺寸 d/λ (d 为球或圆柱的线度尺寸, λ 为声波波长)很小时,它们在声场中的振荡运动速度分别可以写成如下表达式^[2]:

$$\begin{cases} V_s/V_0 = 3\rho/(2\bar{\rho} + \rho), \\ V_c/V_0 = 2\rho/(\bar{\rho} + \rho), \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_s 、 V_c 分别为刚性球体和柱体的振荡速度幅度, V_0 为声媒质(例如水)质点振动速度, $\bar{\rho}$ 为球体或柱体的平均密度, ρ 为声媒质(例如水)的密度。从(2)式可以看出,如果使球体或圆柱体的平均密度等于声媒质(例如水)的密度,即 $\bar{\rho} = \rho$, 则刚性球体或圆柱体的振动速度就等于声媒质质点振动速度。亦可以证明,这时 V_s 或 V_c 与 V_0 之间的相位差为零。换句话说,刚性球或柱体在声场中是与媒质质点同幅度同相位地运动。根据这种原理构成的矢量水听器因此而得名为“同振型”(co-oscillating type)。借助安置于球体或圆柱体内的加速度计或速度计测出球或圆柱体的运动加速度或速度,也就获得了声媒质质点的振动加速度或速度的信息。因为同振型矢量水听器必须采用惯性式振动传感元件,因此,英文文献中都把“同振型”矢量水听器称作惯性型矢量水听器。

同振型矢量水听器在其工作时必须用弹性悬置元件(如橡胶绳或金属弹簧等)将其悬挂在刚性框架上。弹性悬置元件是这种矢量水听器的重要组成部分。因此,悬置元件的设计和使用状况直接会影响到矢量水听器的电声性能。

2.4 组合式矢量水听器

实际结构的矢量水听器一般都与测量标量(声压)的敏感元件包装在一体内,这种结构型式的矢量水听器称之为组合式水听器(Combined Hydrophone)。使用组合式水听器可同时共点地测量声场测点处的三维(或二维)矢量和声压值,以便于对矢量和标量信号作联合处理。图3是本文作者研制的组合式同

振球形和同振圆柱形矢量水听器实物照片。

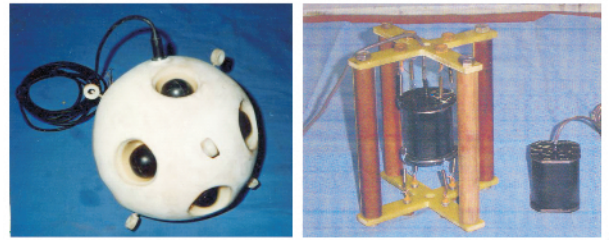


图3 本文作者研制的组合式矢量水听器实物照片

3 矢量水听器的新设计举例

3.1 基于 MEMS 工艺的矢量水听器

目前,任何一种传感器的小型化设计的途径都在走 MEMS(微机电系统)技术的道路,矢量水听器也不例外。文献[7]的作者研制成功一种采用压阻式加速度敏感元件的矢量水听器。压阻式加速度敏感元件由半导体硅制作,如图4所示。在厚约 $400\mu\text{m}$ 的硅片上通过微机械加工工艺制作出可植入掺杂电阻的梁结构和用于产生位移的惯性质量结构。将此硅片与另一刻有槽结构的硅片通过键合技术封接起来,槽内封气体,用来产生阻尼。当声振动引起水听器振荡时,惯性质量结构相对外壳产生相对运动,致使梁结构发生形变。半导体应变电阻的电阻率发生变化(压阻效应),使电阻发生变化。再借助于惠斯通电桥检测出这种电阻变化,实现了声-电转换过程。文献[7]作者研制的压阻式矢量水听器在 1000Hz 频率时的声压灵敏度达到 $-194\text{dB}(\text{reV}/\mu\text{Pa})$ 。指向性图凹点深度达到 20dB 以上。研制者认为,压阻式矢量水听器可实现小型化设计,灵敏度还可进一步提高。

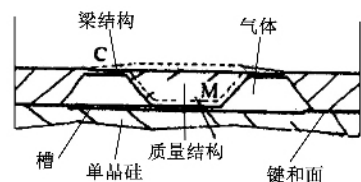


图4 拾振原理图

文献[8,9]报道了基于仿生学的 MEMS 压阻式矢量水听器。该文作者仿效鱼的侧线机械传感细胞(声毛细胞)感知水运动的原理,提出一种人工毛细胞矢量水听器的结构设计。水听器中的压阻传感元件采用 MEMS 工艺制作。传感元件微结构示意图及矢量水听器实物照片如图5所示。

当有水声信号作用于透声杯状外壳时,声波透

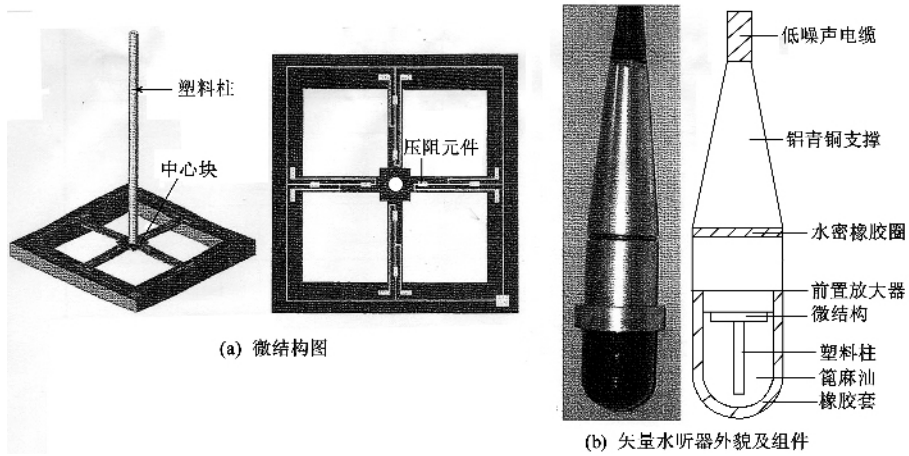


图5 基于仿生学的 MEMS 压阻式矢量水听器

过蓖麻油传导到刚性塑料柱上,在惯性力作用下,刚性柱产生位移运动,致使与其相连的梁发生形变,因此硅压阻器的电阻值发生变化。借助惠斯通电桥将电阻值变化转换为电桥输出电压的变化,从而实现水声信号检测。在设计时使刚性塑料柱的平均密度接近蓖麻油(水)的密度,因此,此矢量水听器被看成是同振型。样器的灵敏度频响及指向性图测量结果表明,该矢量水听器在 40—400Hz 频带内,1/3 倍频程灵敏度变化斜率符合 2dB 规律,在 400Hz 频率上的声压灵敏度为 -197.2dB(扣除前置放大器增益后)。

据最新文献报道,荷兰 Microflown Technologies 公司提出了一种用于水声学中测量媒质质点振速的传感器,被称之为“Underwater-Micro flown”。该公司试图把商品化的用于空气中的振速传感器(商品名称:“Micro flown”)移植到水声学中。空气中用的“Micro flown”质点振速传感器是采用 MEMS 工艺制作的,如图 6 所示。它的工作原理可以简单描述为:在传感元件中安排两根挨得很近的铂电阻丝,电阻丝被加热到约 200℃。当有声波入射到传感器时,空气媒质质点的往复运动产生的热传导作用,造成两根铂丝的温度分布发生改变,总的温度分布使两根铂丝的温度有差异,因而它们的阻值便出现差异。借助于惠斯通电桥,把阻值的变化转换为电压的变化。声—电转换是建立在加热铂丝的阻值的变化幅度与空气质点振动速度幅度两者之间(在给定条件下)存在一定的依从关系基础上的。他们经过理论估算得出,对于同一只 Micro flown 传感器,在空气中和水中的声压灵敏度应相差无几。然而,在充油的驻波管中,对其声压灵敏度进行测量后发现,测量值比预

期值低得多。原因是水媒质对传感器中的铂丝有牵制力影响。他们认为,如果解决了这个问题,尺寸十分小(在 mm 级)、具有精密“8”字形指向性图和低自噪声(低于零级海况时的噪声)的矢量水听器就会诞生。该公司称,已被用于“Micro flown”中的纳米技术在开发革命性水声传感器“Underwater Micro flown”方面有巨大的潜力^[10,11]。

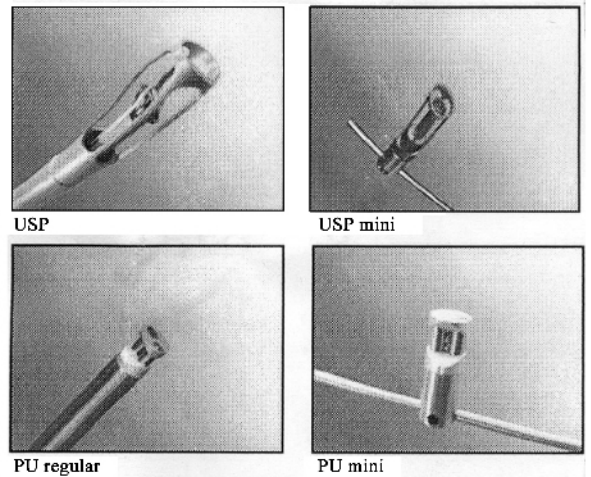


图6 Micro flown 传感器的实物照片

3.2 压电单晶矢量水听器

为满足美国海军的需求,美国 Wilcoxon Reseach 公司和 Applied physical science 公司都推出一种采用 PMN - PT 压电单晶加速度计的矢量水听器^[12-14]如图 7 所示。该压电加速度计除了采用压电电荷系数比 PZT 高大约 6 倍的压电单晶(PMN - PT)元件外,还具有两个重要特点:一是与压电晶片表面相接合的基座及质量块的平面加工成似“城堡”的样式。即这些平面有许多凸起,用以减小压电晶体的受力面积并减小或消除晶体侧面的阻尼作

用,这样有利于提高加速度计的轴向灵敏度;二是利用晶片的剪切模式并且晶片沿特定方向切割,使得晶体在振动作用下只在一个方向(如图7中的Y方向)有输出信号而在其他方向输出极小,这有利于使加速度计的横向灵敏度降到最低程度。据报道^[12],这种矢量水听器的性能满足了美国海军所提出的要求。具体性能指标如下(灵敏度值是在前置放大器输出端测得,放大器增益不详):

工作频率范围 3—70000Hz。

输出灵敏度:

加速度计为 1.0V/g;

声压水听器(使用PZT制作)为 -174dB

(relV/ μ Pa)。

环境条件:

温度为 -40℃—60℃;

静压力为 2500Ps(约 17.2MPa)

水听器长度 ϕ 1.3mm。

水听器直径 ϕ 0.7mm。

浮力(在水中):中性

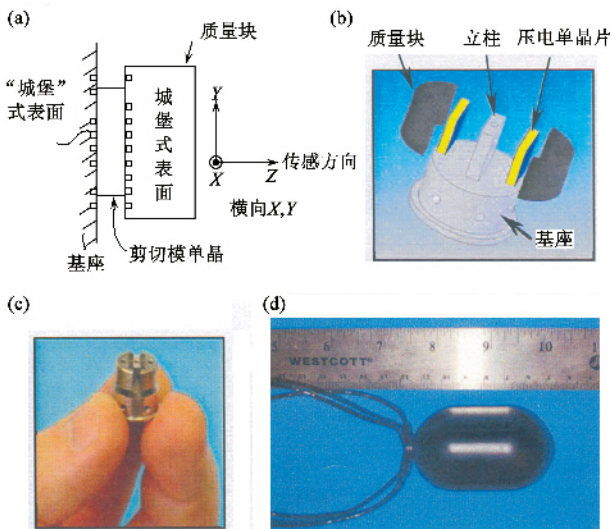


图7 压电单晶加速度计及矢量水听器 (a)单晶加速度计结构示意图 (b)单晶加速度计装配示意图 (c)单晶加速度计实物照片 (d)单晶水听器实物照片

3.3 多模式矢量水听器

在水声技术中已应用多年的多模式矢量水听器(Multimode Hydrophone)近年来又有新发展^[15,16]。多模式矢量水听器是利用薄壁压电圆环或球壳的内(或外)电极分割成4等份或8等份,通过不同的电输出组合,分别可以构成0阶、1阶和2阶工作模式的水听器。这里0阶水听器就是通常意义下的无指向性声压水听器,1阶水听器就是1阶声压梯度水

听器,而2阶水听器就是2阶声压梯度水听器。前面给出的(1)式中所包含的0阶(标量声压)及1阶和2阶矢量,使用多模式矢量水听器可同时共点地测得。更有实际意义的是,将0阶模的输出与1阶、2阶模的输出分别作适当加权后再作相加处理,可以得到一定波束宽度的心形指向性图。例如,用0阶和1阶声压梯度水听器的组合可以形成1阶心形指向性图。它可表示为:

$$B(\alpha, \theta, \phi) = [\alpha + (1 - \alpha)\cos\theta\sin\phi], \quad (3)$$

式中 α 为任意加权系数, θ 为水平方位角, ϕ 为极角。

对于2阶心形指向性图,可表示为:

$$B(\alpha, \theta, \phi) = [\alpha + (1 - \alpha)\cos\theta\sin\theta]^2 \\ = [\alpha^2 + 2\alpha(1 - \alpha)\cos\theta\sin\theta + (1 - \alpha)^2\cos^2\theta\sin^2\phi] \quad (4)$$

它可由0阶与1阶及2阶模作加权相加处理后得到。加权系数 α 取不同值时,根据方向性因子(DF)的积分表达式^[17],可以计算出 α 取不同值时的指向性因子(DF),进而计算出指向性指数:DI = 10lg₁₀(DF)。从计算出的各种指向性图中选择满足水下声系统所要求的条件。最有用的两种指向性图是具有“最佳零值”和“最大DI”的指向性图。当 $\alpha = 0.5$ 时,对于1阶和2阶心形指向性图有“最佳零值”,这时,两者的心形指向性图的DI值分别为4.8dB;而当 $\alpha = 0.25$ 时,对于1阶心形指向性图,有“最大指向性指数”6.0dB;当 $\alpha = 0.2$ 时,2阶心形指向性图出现“最大指向性指数”8.7dB。

这里应注意到,计算指向性因子(DF)的积分表达式^[17]是对所有在水平角和极角内指向性图的平方进行积分,所以,为了在这样的空域内形成心形指向性图,多模水听器内必须包含有足够数目的传感元件。也就是说,形成1阶心形指向性图,要求1个标量(声压)传感器和1个3分量矢量传感器;形成2阶心形指向性图,除了要有1个标量传感器和1个3分量矢量传感器外,还要有1个6分量的2阶矢量传感器。

必须指出,上述具有4等分电极的多模水听器,可以借助于控制电路使1阶心形指向性波束在水平平面内旋转,而2阶心形指向性波束只能以90°间隔作这种旋转。为了使2阶心形指向性波束也能在所有水平角内旋转,文献^[16]中提出的具有8等分电极的圆柱形水听器设计方案,解决了这个问题。图8给出8等分压电陶瓷圆环及其多模水听器实物照片、“最佳零值”和最大“DI”条件下的1阶和2阶心

形归一化指向性图^[16].

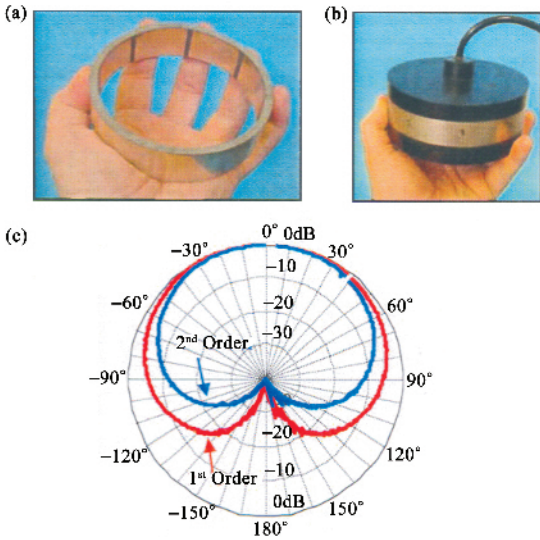


图8 多模水听器 (a) 8 等分压电陶瓷圆环 (b) 水听器实物照片 (c) 1 阶 (蓝色) 和 2 阶 (红色) 心形指向性图

3.4 光纤式矢量水听器

对于检测水下声场标量的光纤声压水听器的研究工作自上世纪 80 年代至今方兴未艾. 与常规的压电式声压水听器相比, 光纤声压水听器具有湿端重量轻、灵敏度高、动态范围大、不受电磁波干扰等优点, 一直激发着人们的极大的研究热情, 使光纤水听器逐步进入实用化阶段. 为了满足某些应用对光纤声压水听器“小尺寸”要求, 用 Bragg 光栅传感元件替代光纤线圈传感元件的新型光纤声压水听器已问世, 使在直径 0.25mm 的标准光纤芯上制造声传感成为可能^[18].

关于光纤矢量水听器的研究也倍受人们的关注. 由于惯性式矢量水听器中的核心部件是加速度计或速度计, 因此, 光纤矢量水听器结构设计首先取决于光纤加速度计和速度计的研究成果. 这里着重讨论以下几种光纤加速度计的结构设计和工作原理.

3.4.1 弯曲圆盘型光纤加速度计^[19]

这种结构型式的光纤加速度计的结构如图 9 所示. 采用周边简支或周边钳定的方式将弯曲圆盘 1 置于壳体 2 上. 由光纤形成的两个扁平螺旋线圈 3 固定于弯曲圆盘表面. 用螺杆 4 将质量块 5 夹紧于上下两个弯曲圆盘之间. 6 是两个光纤终端的反射体. 单频激光从激光源发出后, 经过耦合器 7 发送到光纤加帽的终端, 光从此反射回到光耦合器, 由于干涉作用产生光强度的变化. 这种光强度的变化, 对应于弯曲圆盘在加速度作用下产生轴向弯曲时所造成

的光纤线圈光纤长度的相对变化. 检测器将这种光强度变化转换成相应的电信号, 便实现了加速度的检测过程.

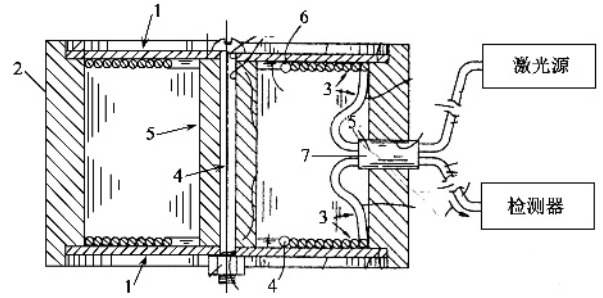


图9 弯曲圆盘式光纤加速度计结构示意图(1 为弯曲圆盘 2 为外壳 3 为扁平式光纤线圈 4 为固定螺杆 5 为质量块 6 为光纤终端反射体 7 为耦合器)

图 10 是图 9 所示弯曲圆盘型光纤加速度计的变形设计. 它的优点是在弯曲圆盘的内、外侧都放置了扁平光纤线圈, 使光纤总长度增加一倍. 这种设计方案可使共模温度、静水压的影响减小到最低限度, 也使灵敏度增大一倍.

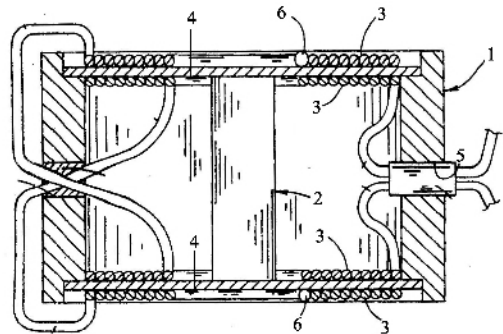


图 10 图 9 结构的变形设计(1 为外壳 2 为质量块 3 为扁平线圈 4 为弯曲圆盘 5 为耦合器 6 为光纤反射端)

图 11 给出另一种弯曲圆盘光纤加速度计的变型的设计^[20]. 扁平光纤线圈 1 和 2 3 和 4 5 和 6 分别固定于三片弯曲圆盘 7 上, 弯曲圆盘 7 用中心杆 8 支撑, 惯性质量 9 安置在弯曲圆盘 7 的周边, 形成类似于“悬臂梁”结构.

3.4.2 基于弹性芯柱的光纤加速度计^[21]

图 12 是这种加速度的结构示意图. 在用弹性材料(如硅橡胶)制成的芯柱 1 上紧绕一螺旋管线圈, 在两个芯柱之间放置质量块 2, 借助预应力调整机构 3, 可使两个芯柱和质量块连成一体. 当外壳 4 与被测振动体刚性相连接时, 在质量块 2 产生的惯性力作用下, 质量块两边的弹性芯柱发生形变, 使每个螺旋管光纤线圈的光纤总长度发生相对变化, 这光

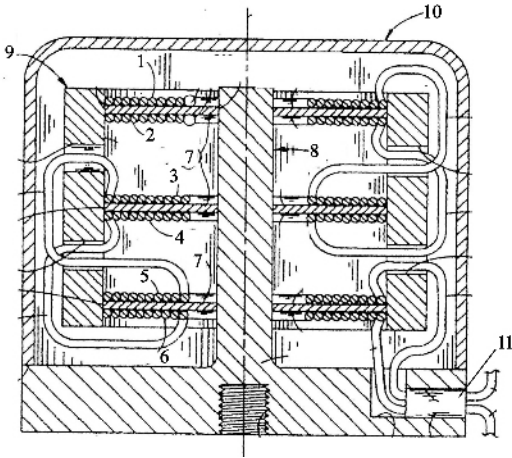


图 11 图 10 的结构变形设计(1—6 为扁平线圈;7 为弯曲圆盘;8 为中心柱;9 为质量块;10 为外壳;11 为耦合器)

纤长度的相对变化通过干涉仪转换为光强度的变化,即可实现加速度的测量.图 12 的这种方案被称作推挽式.

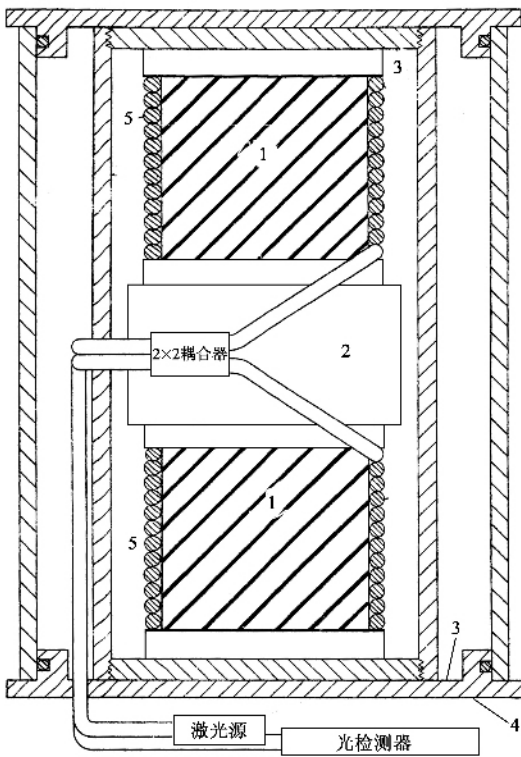


图 12 弹性芯柱光纤加速度计原理图(1 为弹性芯柱;2 为质量块;3 为预应力调解机构;4 为基座;5 为螺旋线圈)

图 13 是采用这种设计方案的三维光纤干涉式速度传感器的结构示意图.

Hu 等人^[22]报道了他们研制的基于弹性芯柱的三维光纤矢量水听器.图 14 是实物照片.水听器直径为 100mm.在 5—500Hz 工作频率范围内,加速度

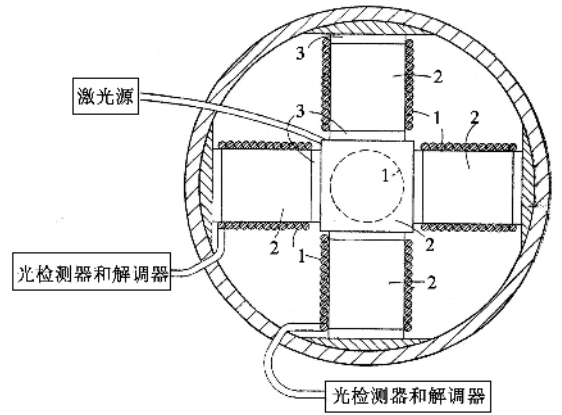


图 13 三维弹性芯柱光纤加速度计结构原理图(1 为螺旋线圈;2 为弹性芯柱;3 为预应力调解机构)

计的灵敏度约为 656rad/g.

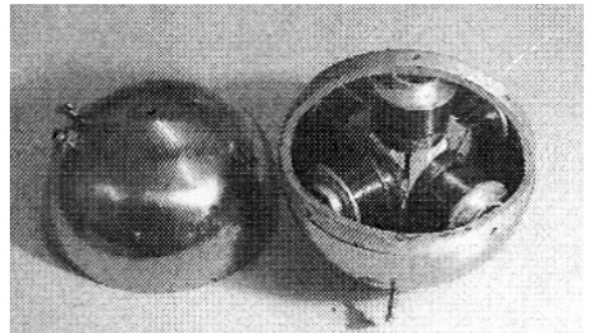


图 14 芯柱式光纤矢量水听器实物照片

3.4.3 基于充液弹性圆柱腔的光纤加速度计^[23]

这种设计方案可以看作是上述弹性芯柱的变型设计,如图 15 所示.在薄壁弹性芯柱腔内充满液体,芯柱外表面缠绕光纤线圈.如果外壳受加速度作用,芯柱腔内的液体对腔壁产生动压力,在两个线圈芯柱之间产生动压差.与芯柱“结伴相随”的两个光纤线圈产生光路长度差,它被干涉仪检测转换为光强度的变化.

这里要强调的是,任何一种加速度计(常规或光纤式),其加速度灵敏度都与其中的质量块的质量成正比,而与其中的弹性元件的刚度成反比.对于干涉型光纤加速度计,其灵敏度还与光纤长度和工作波长成比例.而光纤长度可能影响到换能元件的刚度(比如对于芯柱式).工作频带宽度、噪声水平、尺寸、重量、坚固性、指向性、造价等因素都会影响到结构设计方案的选择.文献^[23]对用上述 3 种设计方案制成的光纤加速度计(速度计)样器性能指标进行了综合性评价.结论是:芯柱式设计方案给出最有效的换能机理,而弹性弯曲圆盘和充液式设计方

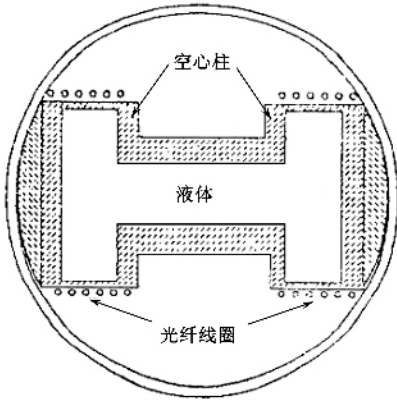


图 15 充液式光纤加速度计原理图

案在一些特定的应用场合也各具特色。

3.5 可以刚性固定的同振型矢量水听器

通常情况下,同振型矢量水听器在使用时必须用符合一定技术要求的悬置系统将其固定于重而刚性的框架或平台上。在工程实践中,这种悬挂系统的制作与使用给使用者带来诸多不便。举例说,当矢量水听器的载体(如潜艇等)在运动中或因某种原因产生振动时,就会给矢量水听器的正常工作带来不利影响。为此美国宾州大学研究人员申请一项专利技术,提出了同振型矢量水听器的结构设计方案^[24]。图 16 是设计方案示意图及实物照片。

该设计方案的实质就在于把加速度计的基座延伸到加速度计外壳的外面,而加速度计的惯性质量块及外壳用弹性材料与基座相连。这种设计方案不仅适用于三维球形,也适用于二维圆柱形矢量水听器。专利人称,这种设计方案可使矢量水听器的尺寸做得相当小,工作频带的上限可提高到 20kHz。

4 矢量水听器的特性

矢量水听器之所以受人们的青睐,是因为它有着一般水听器(例如常规声压水听器)所不具备的特性,使得它在水声领域大有用武之地。甚至在石油测井、海洋地质等领域也有着吸引人的应用前景。

矢量水听器性能的独特之处简要地说有如下几点:

4.1 “8”字形(也称余弦形或偶极子形)指向性

理论和实践都已证明,不论哪种结构型式也不论基于何种工作原理,矢量水听器在其工作频率范围内,其指向性图均呈“8”字形。在理想情况下,三

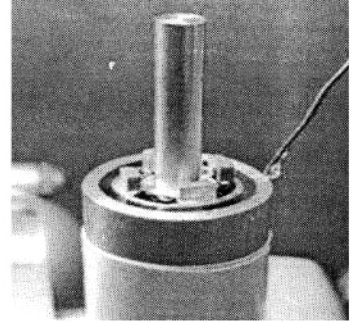
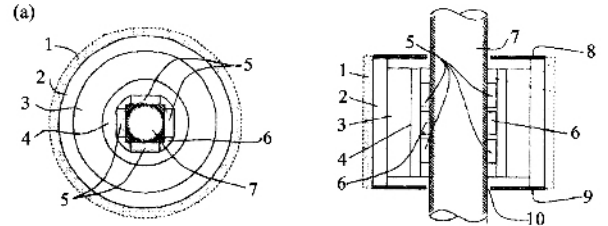


图 16 可以刚性固定于平台上的圆柱形矢量水听器 (a) 结构示意图(1 为人造泡沫塑料 2 为外层壳体 3 为顺性材料 4 为第二壳体 5 为压电元件(厚度极化) 6 为压电元件(切向极化) 7 为中心安装柱 8 9 为声压通道压电元件,10 为柔性缝隙) (b) 实物照片

维指向性图则为两个相切的圆球,相反地,普通的无指向性水听器,在理想条件下,它的指向性图为一圆球形,如图 17 所示。从使用的观点来说,无指向性的水听器不能抑制海洋中固有的环境噪声,也就是说,这种水听器对来自空间的任何方向的环境噪声都全部“照收”,而有指向性的水听器则对来自某些方向的噪声有抑制能力。如果用指向性指数(DI)来表征水听器抑制噪声的能力,则对于无指向性水听器, $DI = 0\text{dB}$;而对于单只 1 阶矢量水听器,则 DI 值为 4.8dB。换句话说,对于无指向性水听器,它能检测到的最小信号级取决于环境噪声级;而 1 阶矢量水听器由于它具有“8”字形指向特性,它具有抑制一部分环境噪声的能力,抑制能力为 4.8dB。

如前面介绍“矢量水听器”的结构类型中曾提及,一般矢量水听器都包含有测量声压的传感器,以及 2 个或 3 个矢量分量传感器,亦即一个矢量水听器总共可以有 3 个或 4 个信号输出通道。视使用具体要求,可以把声压输出信号与矢量输出信号进行组合,以形成心形指向特性,如图 17 所示那样。这样一来,用一只矢量水听器可以得到具有不同指向性指数(DI)的指向性图。图 17 中所示的两个心形指向性图,声压通道输出信号与一阶矢量输出信号通道适当加权组合后得到的,分别称为“最佳零点”和“最佳指向性指数(DI)”心形指向性图。如果将声压

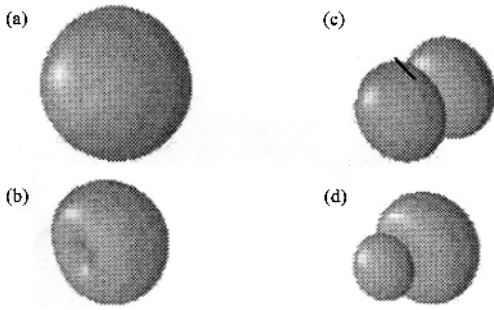


图 17 0 阶和 1 阶水听器输出组合形成的指向性图 (a)无指向性(DI=0dB) (b)心形指向性(DI=4. 8dB) (c)偶极子指向性(DI=4. 8dB) (d)最佳指向性指数心形指向性(DI=6dB)

通道输出信号与 1 及 2 阶矢量通道输出信号加权后作相加处理后,便可得到“ 2 阶心形指向性图”。也会分别得到“最佳零点”和“最佳指向性指数”两种条件下的指向性图,它们的指向性指数(DI)分别为 7dB 和 8.7dB。

如果用矢量水听器组成声接收阵(例如线列阵)带来的好处就更明显。举例来说,如果用无指向性的声压水听器组成等间距的 15 元线列阵,假定阵的工作频率为 2kHz,阵元间距为半波长,则阵总长度至少要超过 5m,而其阵的指向性指数约为 11.7 dB;如果用带有声压通道和一阶矢量通道的矢量水听器作阵元,在同样的阵元间距和工作频率条件下,要达到相同的指向性指数,只需要 5 只矢量水听器,而线阵的总长度只有 1.5m。从这个简单例子我们可以看出,用有偶极子指向性矢量水听器组成接收阵时,会带来的好处是:不仅可以使阵元数目大大减少,阵的尺寸也明显缩小;也使接收阵造价降低;便于载体在水下的拖曳、布放和回收等。

4.2 同时共点地提供声场测点处的标量及矢量的幅度与相位信息

如前提及,一只组合水听器包含用来测量标量(声压)的传感器和测量矢量(振动加速度、速度等)的传感器,两种传感器被包装为一体,并且,矢量通道和声压通道具有同一声中心。这就可以用一只组合水听器同时共点地测量声场测点处的标量和矢量信息。

因为声压和质点振速的乘积确定着声场测点处的声能流密度(声强),声能流密度是矢量,它不仅反映着声波携带能量的多少,也反映着声波能量流传递时的方向“轨迹”,也能反映着声波能量流中“有功”和“无功”分量各占的比例等等。这就使得矢

量水听器成为全面洞察声场特性的极其有力的工具。

我们应注意到,当我们使用组合水听器去研究声场的能量流特性时,我们不仅利用该水听器提供声场的标量和矢量的幅度信息,还利用了它所提供的标量与矢量间的相位差信息。

然而,作为一只实际的组合水听器,由于矢量水听器本身固有的指向特性以及矢量通道传感器声电转换机理的不同(压差式、加速计式或速度计式),使得组合水听器各通道输出电信号间存在特有的相位差特性。对此,试作如下讨论。

对于压差式和加速度式矢量水听器,声压通道和三个正交通道的归一化指向性函数可以写成^[2]:

$$\begin{cases} D_p = 1 \\ D_x = N_x \frac{\partial p}{\partial x} = -j \cos \varphi \sin \theta \\ D_y = N_y \frac{\partial p}{\partial y} = -j \sin \varphi \cos \theta \\ D_z = N_z \frac{\partial p}{\partial z} = -j \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

其中 D_p, D_x, D_y, D_z 分别为声压通道和 x, y, z 三个正交矢量通道的归一化指向性函数, N_x, N_y, N_z 为归一化因子, φ 为水平方位角, θ 为极角。由(5)式可以导出声压通道与各矢量通道之间、各矢量通道之间的相位差表达式:

$$\begin{cases} \Delta \varphi_{pi} = -\frac{\pi}{2} \text{Sgn}(lmD_i) \\ \Delta \varphi_{il} = \frac{\pi}{2} [\text{Sgn}(lmD_i) - \text{Sgn}(lmD_l)] \end{cases} \quad (6)$$

式中 $i, l = x, y, z (i \neq l)$, $\Delta \varphi_{pi}$ 为声压通道与矢量通道间的相位差; $\Delta \varphi_{il}$ 为各矢量通道之间的相位差; Sgn 为符号函数。

图 18 给出了在理想情况下 $\Delta \varphi_{px}, \Delta \varphi_{py}$ 以及 $\Delta \varphi_{xy}$ 与水平方位角的关系。图中罗马数字表示象限。从此图可以看到,通道间的相位差 $\Delta \varphi$ 随方位角有跃变特性,且 $\Delta \varphi$ 的跃变幅度都为 180° ; 当 φ 处于不同象限时,每个象限都对应着各自一簇 $\Delta \varphi$ 值。这里必须指出,对于动圈式矢量水听器,上述各相位差随水平方位角的变化关系略有差别。

上述有关矢量水听器固有的相位差特性与声场中声压-矢量间的相位差特性并不是一回事。前者是矢量水听器本身“与生俱有”的,而后者是由声场本身特性决定的。因此,当处理由矢量水听器提供的声场信息时,应视矢量通道所用传感器的类型对矢量水听器固有的相位差特性进行相应的修正。

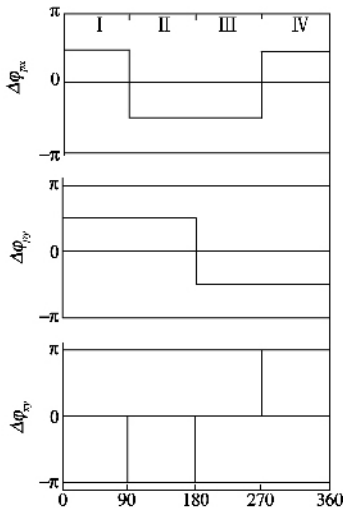


图 18 矢量水听器标量与矢量及矢量间相位特性

对于矢量水听器本身固有的相位差特性有其实际的利用价值。例如 (1) 我们可以利用 $\Delta\varphi$ 的跃变特性来判断水下噪声源(被检测目标)所在的方位并进行跟踪。尤其在低信噪比条件下,利用矢量水听器固有的这种相位差信息往往比利用其提供的幅度信息更为有效。在某些实际应用场合,这不失为一种不错的选择。(2) 当对组合水听器的性能进行测试和评价时,声压通道与矢量通道之间的相位差,以及各矢量通道之间的相位差是否符合理论预测值应是衡量矢量水听器性能优劣的重要指标之一。因此,相位差的测量值偏离理论值不应超出一定的范围(视相位测量系统和测量方法以及实际需求而定)。

4.3 低声频和次声频段优越性凸显

要使小的波尺寸的单个常规声压水听器在低声频特别是次声频段具有指向性特性是难以做到的。与此相反,矢量水听器得天独厚的指向性令其竞争对手“望尘莫及”,而且工作频率越低,它的优点越凸显出来。因此,矢量水听器在水声技术领域,在低声频和次声频段适用性更强。由于在海水媒质中,声波频率越低,传播距离越远。这时在水下声接收系统中,矢量水听器占据有利地位是理所当然的。

5 矢量水听器应用例举

矢量水听器在水声及其他技术领域有着广泛的用途。因篇幅有限,不可能作全面介绍,只列举几个应用例供读者参考。

5.1 在水上航道、港口安全警戒系统中的应用^[25]

不论是军事设施的安全还是为政府机关、商业或市政设施的安全,近些年来,对水上航道和港口的安全警戒越来越为人们所重视。因为上述这些设施很多位于或靠近港口或航道,这些地方大都是公众可以接近的,很容易被袭击者作为攻击的目标。入侵的力量可能是游泳者、蛙人、无人驾驶水下航行器、潜艇或水面滑翔机等。这些入侵力量在其运动中不可避免地会产生具有某种特征的“声音”(这里称“目标信号”)。而在港口或航道上,商船、水上交通工具或者工业生产设备等也会产生较强噪声(背景噪声),往往掩盖了目标信号,使得常规的水下声检测系统不能有效地检测到水下入侵者。

利用矢量水听器固有的指向性和抑制环境噪声的能力,就可以及时准确地发现水下目标信号。这就为安全保卫人员提供足够的时间制止入侵者的攻击。至少在获悉即将发生的攻击后,能拯救上述设施中的工作人员。

5.2 在拖曳阵、固定阵、船壳阵和声呐浮标中的应用^[15]

冷战结束后,美国海军把反潜战态势由美国海岸的深海安全重新定位于浅海区域。在浅海区域,安静型柴-电潜艇频繁出没。因此美国海军为缓解这个问题,把“浅水到深水水域快速地进行潜艇提示、检测和定位”以及“防水下攻击(包括舰船防多重齐射鱼雷攻击)的自卫平台”作为技术突破口。在这些研究项目中,追求使用先进的多模式水听器和单晶矢量水听器技术。这些技术已经应用于线列阵(拖曳阵、固定阵)、空投声呐浮标以及声拦截系统中。图 19 是这些应用的示意图^[15]。对此图,简要作些说明如下:把矢量水听器应用于潜艇拖曳阵,解决了在对威胁潜艇定向时常规声压水听器线阵存在的“左右舷模糊”的问题,不必对线阵作费时的机动控制。从而,使艇员在战时的响应时间大大缩短;将矢量水听器应用于水面舰拖曳阵,不仅解决了上述的“左右舷模糊”的难题,而且还使水面舰有更多的逃脱机会;把矢量水听器应用于固定阵中,使阵的物理孔径大大缩减而不损失声阵的增益;把矢量水听器应用于声呐浮标中,可以发展适用于多基地声呐系统中的小型高指向性声接收器;多模式水听器应用于声呐浮标和声拦截系统,能在不增加换能器尺寸的条件下使检测距离增大。

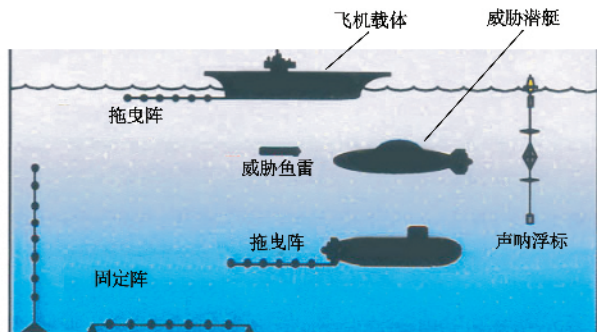


图 19 矢量水听器应用示意图

5.3 在潜艇辐射噪声测量中的应用

潜艇辐射噪声级直接影响其水下环境中的隐蔽性。辐射噪声级越低,被声呐发现的可能性越小。所谓“安静型”潜艇就是指它在水下环境中辐射噪声级很低而不易被发现。因而辐射噪声级是评价潜艇性能质量的重要指标之一,必须对这一指标进行实测;另一方面,潜艇辐射噪声场是分布于潜艇壳体上许多个“子声源”辐射噪声叠加的结果,详细了解每个子声源对总噪声级的贡献大小,对于选择合适的减振降噪措施以及对减振降噪措施实施后的效果加以评价都有重要的实际意义。

文献[26]的作者报道了用矢量水听器线阵测量潜艇辐射噪声级的研究结果。作者采用了两种信号处理算法:线性矩阵和声强处理。

文献[27]的作者使用了5元矢量水听器的垂直线阵,在美国海军声学特征测量实验场,就潜艇壳体上的声源定位问题进行了静态模拟实验研究。声源定位是通过比较矢量通道中三轴加速度计的输响应得到的,如图20所示。被定位声源与参考方向(图中为加速度计的 x 轴方向)之间的垂直角 θ 的正切等于加速度的垂直分量与参考方向上的分量之比。类似地,也可得到水平角的正切,该文作者认为,声源定位测量的精确度受到阵信噪比而不是声波波长的限制,如果预先知道在感兴趣的频带内只有一个被定位的声源,可以得到高角度分辨力,这种高角分辨力甚至在低频(对应于声波波长,远大于定位测量的空间分辨力)也能达到。

5.4 在地声反演、海底沉积层声学参数测量中的应用

基于矢量水听器阵比常规水听器阵能提供更多的声场信息的事实,文献[28]的作者把矢量水听器用于地声反演研究中。反演的方案是把声压信号和

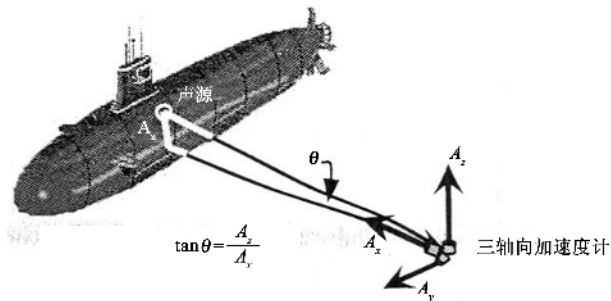


图 20 声源定位原理

振速信号传输损失的差别与匹配场处理方法相结合。该作者认为这种反演方法的优点是,它能减小沉积层声速反演结果的不确定性,并且沉积层衰减的反演结果与声源级无关。

Gordienko 等人把矢量水听器应用于海底的声学特性(海底与水界面的输入阻抗、声反射系数等)的测量^[29]。他们认为,海底声学参数的测量问题,在高频范围或多或少已经得到解决,而在低声频段(几十赫至几千赫范围)仍然存在许多困难。他们分别采用“阻抗法”和“声压-振速幅度法”以及“测量声压与振速水平分量或垂直分量之间的相位差方法”,确定了海底的声反射系数。而“相位差法”最适用于平坦海底区段。阻抗法则是基于海底反射系数与海底-水界面处的输入阻抗的关系,而输入阻抗可通过用矢量水听器测量在该界面一点处的声压和垂直振速后得到。这些方法都可以得到反射系数与频率、声波入射角的关系曲线。

文献[30]报道了用矢量水听器测量墨西哥湾佛罗里达海岸沉积层声速的实验及其结果。矢量水听器被埋入海床内,用它测量了300—3000Hz频段内沉积物声速与频率的关系。据称,在此频段内作这种测量一直被认为特别困难。把矢量水听器测得的声强与实验几何学、声传播条件结合起来,建立起沉积物声速与声波入射角、声波频率的关系。在较低频段,将锚泊的研究船作为辐射噪声源,而在800—3000Hz频段,则使用3只锚系在水柱中的声发射器作为声源,这种布置可以调整声波射入沉积层的角度。

6 结束语及展望

矢量水听器作为一种新型水声接收换能器受到人们的普遍关注。由于篇幅有限,本文仅就矢量水听器的结构和工作原理作了简要描述,对其应用问题

也只是粗略地作了介绍.在矢量水听器技术领域,几乎每天都在涌现新的研究成果,提出新的研究课题,激励着人们不断地探索着.就矢量水听器的结构设计来说,如同其他领域的传感器一样,正在沿着“三化”(微型化、多样化和微电子化)的方向发展,其性能、质量会越来越精良,应用的领域也会随之越来越宽广.可以期待,随着人类科学技术水平的不断提升,矢量水听器技术将会继续以越来越吸引人的面目展示于世人面前.

参考文献

[1] Shchurov V A. Vector acoustics of the Ocean. Vladivostok ,Dalnauka , 2006

[2] Gordienko V A *et al.* Vector-phase methods in acoustics , Moscow , Nauka ,1989(in Russian)

[3] Skrebniev G K. Combined hydroacoustic receivers , SPb , ELMOR , 1997(in Russian)

[4] 贾志富. 传感器技术 ,1997 ,16(1) :22[Jia Z F. Journal of Transducer Technology ,1997 ,16(1) 22(in Chinese)]

[5] 贾志富. 应用声学 ,1997 ,16(3) 20[Jia Z F. Applied Acoustics ,1997 ,16(3) 20(in Chinese)]

[6] 贾志富. 应用声学 ,2001 ,20(4) :15[Jia Z F. Applied Acoustics ,2001 ,20(4) :15(in Chinese)]

[7] 陈丽洁,杨士莪. 应用声学 ,2006 ,25(5) :273[Chen L J , Yang S E. Applied Acoustics ,2006 ,25(5) 273(in Chinese)]

[8] Zhang B Z *et al.* Microsyst. Technol. ,2008 ,14 821

[9] Xue C Y *et al.* Microelectronics Journal ,2007 ,38 :021

[10] De Bree H E *et al.* Real time sound field visualization in the near field , far field and at absorbing surface. Acoustic's 08 , Paris , France. pp297 - 302 June 29—July 4 2008

[11] De Bree H E *et al.* ACTA Acustica United with Acustica ,2008 , 94 Suppl. 1 :S38

[12] Deng K K. Underwater Acoustic Vector Sensor Using Transverse Response Free , shear Mode , PMN-PT Crystal , U. S. Patent No 7066026B. Jun. 27 2006

[13] Shippis J C , Deng Ken. A miniature Vector Sensor for line array application Ocean's 2003 , Vol. 5 , pp2367—2370 , 2003

[14] Deng K *et al.* Method and apparatus for strain amplification for piezoelectric transducers. U. S. Patent No. 6715363B , April 6. 2004

[15] Applied physical Corp(formerly Acoustech Corp) Directional acoustic receivers for anti-submarine warfare and Torpedo defense , Website www. Aphysci. com

[16] James A M , Scoff C J. Forming first-and second-order cardioids with multimode hydrophone Ocean 's 2006 , pp65—70 , 2006

[17] Urick R J. Principles of underwater sound . Peninsula publishing , Los Altos , CA 1983. Section3. 3

[18] 孙贵青,李启虎等. 物理 ,2006 ,35 :645[Sun G Q , Li Q H *et al.* Wul(Physics) 2006 ,35 :645(in Chinese)]

[19] David A. Brown *et al.* Fiber optic flexural disk accelerometer. U. S. Patent No. 5317929 , Jun. 7 , 1994

[20] Thomass J. Hoffer *et al.* , Fiber optic accelerometer with centrally supported flexural disk. U. S. Patent No. 5369485 , Nov. 29 , 1994

[21] Steven L Garrett *et al.* Multiple axis fiber optic Interferometer seismic sensor. U. S. Patent No. 4893930 , Jan. 16 , 1990

[22] Yongming Hu *et al.* Development of fiber optic hydrophone 2nd International conference & Exhibition on “ underwater acoustic measurements :Technologies Results ” , pp1001—1006

[23] David A. Brown , steven L. Garreff . An interferometric fiber optic accelerometer SPIE Vol. 1367 , Fiber optic and laser Sensors VIII , 1990

[24] Nathan kahikina Naluai , Acoustic intensity methods and their applications to vector sensor use and design. The Pennsylvania state University , UMI. No. 3248376. 2006

[25] Clayships J. The use of vector sensors for underwater port and water-way security , sensors for industry conference , pp :41—44 (New Orleans , Louisiana , USA) , January , 2004. 27—29

[26] Joseph C , Gerald T. J. Acoust. Soc. Am. , 2006 ,119 3446

[27] Joseph C , Gerald T. Localization of radiating source along the Hull of a submarine using a vector sensor array. Ocean 's 2006

[28] Li F H , Zhang R H. J. Acoustic , Soc. Am. , 2008 , 123 3351

[29] Ermolaev E *et al.* Vector-Phase methods of bottom reflecting properties research in shallow shelf area. Acoustics 08. PP195—199. Paris , 2008

[30] Anthony P L *et al.* J. Acoustic Soc. Am. , 2006 ,119 3445



· 读者和编者 ·

更正

《物理学咬文嚼字之二十：准、厦、假》一文(物理 38 卷(2009)2 期,121)中,出现如下错误(1)第121页脚注1中科技造假事件为“汉芯造假案”(2)第123页最后一段中的“动能 $V \times V$ ”属排版错误,应为“动能 $V \cdot V$ ”.特此更正.

作者和编辑部为工作中的疏忽谨向广大读者致歉.