

第三讲 让声纳系统耳目一新:新型 水声换能器与换能器新技术*

莫喜平[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要 文章综述了新型水声换能器设计与换能器新技术的重要进展. 主要涉及 稀土超磁致伸缩材料、弛豫铁电材料、压电聚合物薄膜等新材料的发展及其水声换能器的新设计, 基于新结构的新型水声换能器, 利用不同能量转换机理的新型水声换能器, 宽带换能器新技术等等. 对于接收型换能器着重介绍了光纤水听器 and 矢量水听器.

关键词 换能器, 光纤水听器, 矢量水听器

Innovations for sonar : new technology and designs for underwater acoustic transducers

MO Xi-Ping[†]

(Institute of Acoustics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

Abstract Recent significant advances in the design and technology of underwater acoustic transducers are reviewed. These include the development of functional materials for transducers , and new designs based on new materials such as rare earth giant magnetostrictive materials , relaxor ferroelectrics and piezoelectric polymer films. Novel types of transducers with innovative structures or different energy transfer mechanisms , and the most recent technology for broadband transducers are described. In the category of receiver type transducers discussion is focused on the fiber optic hydrophone and vector hydrophone.

Keywords transducer , fiber optic hydrophone , vector hydrophone

1 引言

声波是迄今为止人类所掌握的唯一能在浩瀚大海中远距离传递信息和能量的载体, 在陆地上人们利用电磁波研制了雷达, 类似地人们利用声波这种信息载体研制了对水下目标实现探测、定位、识别和通信的电子设备——声纳. 面对广阔的海洋, 声纳肩负着重要的使命. 触及浩瀚大海的各个角落、识别其中形形色色的事物、告诉人们海底世界的真面目、协助人们探究海洋的奥秘……成为水下通信导航、水产渔业、海洋资源开发、海洋地质地貌探测、军事武器等领域的重要手段. 声波之所以成为水下最佳信

息载体, 是由于在水介质中声波与电磁波等其他物理场相比具有最小的衰减系数, 可以获得远距离传播, 这个优点使得声纳从最初利用超声波观察水下目标开始而不断发展起来. 目前声纳的工作频段已经拓展到很宽的范围, 主动声纳从几十赫兹到几十兆赫兹, 被动声纳的低频端已经拓展到次声范围, 在如此宽的频带内, 按规定的信号形式激发产生声波和不失真地感知与接收水中声波信号的重要器件被称为声纳换能器或声纳基阵. 这些器件是声纳系统最前端的设备, 也是声纳系统与水介质相互作用、交

2005 - 09 - 30 收到初稿 2006 - 01 - 19 修回

[†] Email: moxp@mail.ioa.ac.cn

流信息的“窗口”，是声纳系统功能的“实现者”，于是声纳换能器或声纳基阵被人们形象地喻为声纳系统的“耳目”。

随着声纳技术应用领域的不断扩大，军事对抗及作战需求的日益提高，新原理、新技术、新型声纳设备纷纷涌现，层出不穷。新型声纳技术的发展要求带动了换能器技术的飞速发展，同样换能器领域的技术突破和新材料、新机理、新结构换能器的发展，也让声纳系统“耳目一新”。在此就笔者所掌握的资料和有限的理解水平简要综述一下换能器技术近些年的发展状况，主要包括新材料水声换能器、新结构新机理水声换能器、新型水听器技术、宽带换能器技术等等。

2 新材料水声换能器

换能器是声纳系统中实现能量转换的器件。在换能器中，有一种特殊的材料具有能量转换的本领，这种材料叫做功能材料。用来制作换能器的功能材料主要包括压电材料（如压电晶体、压电陶瓷、压电聚合物等）和磁致伸缩材料（如镍、钴、镍铁合金、铁氧体、稀土铁合金等），它们分别利用压电效应和磁致伸缩效应实现电场能或磁场能与机械能之间的相互转换。换能器技术的突破根本上决定于功能材料的技术突破。近些年功能材料领域取得了方方面面的技术成就，也给换能器技术的发展带来了曙光。1963年，美国的 Clark 博士发现镧系稀土材料有惊人的磁致伸缩特性，但由于居里点低于室温而没有得到实际应用。后来人们发现稀土元素和铁等组成二元、三元或四元合金在室温下也具有超磁致伸缩特性，其中最具有代表性的稀土合金是 Terfenol-D（组分为 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ ），它已成为 20 世纪 80 年代以来倍受关注的新型功能材料。弛豫铁电单晶铌镁酸铅-钛酸铅（简称 PMN-PT）和铌锌酸铅-钛酸铅（简称 PZN-PT），是新型的复合钙钛矿型晶体材料，也是异军突起的一类很有应用前景的新型功能材料。在此之前，换能器材料曾经普遍使用过镍，1917 年，法国科学家朗之万用石英晶体制造了声纳换能器，开创了压电材料在声纳上应用的先例，20 世纪 40 年代，具有较强压电性能的 $BaTiO_3$ 陶瓷研制成功，在第二次世界大战期间被广泛用于声纳系统，50 年代发展起来的 PZT 压电陶瓷，以其较宽的工作温度范围和优良的机电转换效率弥补了 $BaTiO_3$ 陶瓷的不足，一度成为水声换能器的首选材

料，其中高能量密度的压电陶瓷材料是 PZT-8。对上述材料作简单的比较：Terfenol-D、PMN-PT、PZN-PT 可产生的应变约是 PZT-8 的 5 倍，是镍的 50 倍；PMN-PT、PZN-PT 的压电常数 d_{33} 是 PZT-8 的 6—8 倍。利用这些新材料来研制新型水声换能器是当前的热门课题之一。

2.1 稀土超磁致伸缩材料水声换能器

稀土超磁致伸缩材料利用磁致伸缩效应实现磁场能与机械能之间的相互转换，主要用来研制低频大功率水声发射换能器。先介绍一种“复杂”结构的换能器——高温超导磁致伸缩水声换能器^[1]，如图 1 所示。单从换能器结构形式上讲，其结构很简单，为普通的双辐射头纵向换能器。这里所谓的“复杂”是指它丰富的物理内涵。

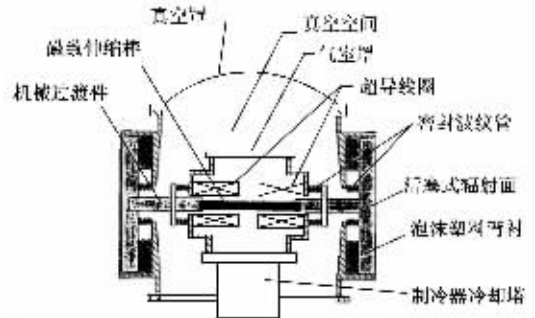


图1 高温超导磁致伸缩换能器

稀土合金材料在低温条件下的磁致伸缩本领比室温条件下更大，如 77 K 温度下 $Tb_{0.6}Dy_{0.4}$ 材料的磁致伸缩应变最高值为 0.65%，而 Terfenol-D 在室温条件下磁致伸缩应变最高值为 0.25%。文献[1]研制了 50—60K 温度范围的 $Tb_{0.6}Dy_{0.4}$ 材料磁致伸缩水声换能器。稀土合金棒状材料置于冷气室内，由制冷器的冷却塔循环制冷，冷气室内由超导材料线圈提供直流偏磁场和激发磁场，激发磁致伸缩棒产生伸缩振动并通过机械过渡件传递到活塞式辐射面，活塞式辐射面推动水介质产生压力波辐射出去。在结构中设计了真空腔，目的是隔绝热传导，真空腔外壁是穹形耐压罩，能承受 10 个大气压的压力。主要技术参数如下：谐振频率 430Hz，最大声源级 181.4dB，效率约为 25%。这种换能器制作工艺复杂，近些年人们还是愿意采用室温条件工作的 Terfenol-D 材料，舍弃一些磁致伸缩应变，而代之以新结构形式实现优良的辐射性能。下面简要介绍几种结构磁致伸缩材料水声换能器（见图 2）方面的研究进展。

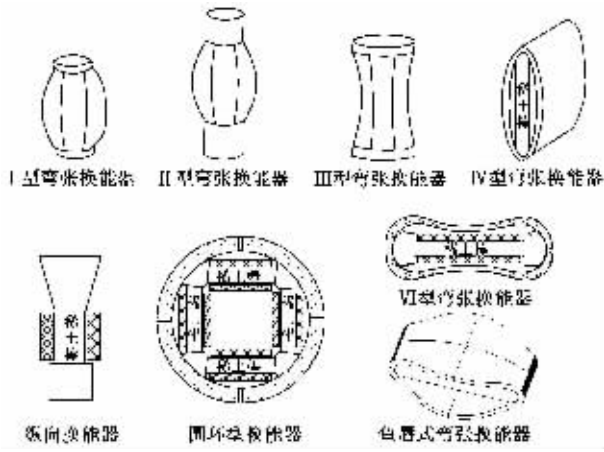


图2 磁致伸缩换能器结构示意图

纵向换能器结构简单,磁致伸缩棒与前辐射头和尾质量块结合成类似一维振动系统,前辐射头一般为轻质材料,尾质量块一般为密度大的材料,以实现辐射面输出更大的振动位移。Dubus 等^[2]介绍了两种用 Terfenol - D 材料研制的纵向换能器,其一是一般纵向换能器,谐振频率为 1200Hz,声功率为 3kW,换能器重量为 60kg;其二是稀土棒两端都设计成喇叭形的双端辐射纵向换能器,谐振频率为 400Hz,声功率为 1.5kW,换能器重量达 100kg。

圆环形换能器:由若干个稀土棒围成正多边形,通过过渡件激发一系列圆弧面作径向振动实现大功率声辐射。Toshiaki 等^[3]研制了一系列稀土低频大功率圆环型换能器,其中包括谐振频率为 200Hz 的换能器(内径 0.56m,外径 0.94m,高度 0.37m,声源级 193dB,重量 410kg)和谐振频率为 30Hz 的换能器(直径 2m,高度 1.1m,声源级 195dB,重量 5t)。

弯张换能器是利用压电陶瓷堆或磁致伸缩棒的纵振动来激励具有振幅放大效应的外壳(或桶条梁)辐射面作弯曲振动的一类换能器,图 2 中列举了几种常用类型的弯张换能器,其中 I、II、III 型具有共同特点,由纵振动棒激发旋转对称弯曲壳体,壳体可以是连续结构,也可以是切缝加工成一组梁的结构。Purcell^[4]用 Terfenol - D 材料研制了凹型桶条梁弯张换能器(III 型),谐振频率为 1300Hz,声源级为 188.7dB,带宽为 600Hz,由于采用单棒开放磁路,在谐振频率下,交流电声效率最大仅为 7%,换能器重量为 2.7kg。

图 2 中 IV 型、VII 型、鱼唇式弯张换能器具有共同特点,换能器由纵振动棒激发凸形或凹形椭圆壳体的弯曲振动实现大功率辐射,其中鱼唇式弯张换能器采用了振幅放大效应与面积加权作用,提高了

声辐射功率。文献 [5]报道了这种新型低频大功率水声换能器,包括谐振频率为 210 Hz、450 Hz、800 Hz 和 1200 Hz 的换能器研究成果,目前这种新型换能器应用于低频主动声纳阵、声学目标声源、噪声模拟器等声学系统。

2.2 弛豫铁电材料水声换能器

弛豫铁电材料是一类颇有潜力的功能材料,可分为电致伸缩陶瓷类型和弛豫铁电单晶类型,弛豫铁电单晶比电致伸缩陶瓷材料制作工艺要复杂得多。已有研究者用这类材料制作了多种类型换能器,如弯张换能器、纵向换能器等^[6]。这类材料的换能器制作技术比较复杂,需要加直流偏置电场,施加预应力,控制工艺温度等。文献 [7]利用 PMN - PT - BT(铌镁酸铅 - 钛酸铅 - 钛酸钡)电致伸缩陶瓷研制了 IV 型弯张换能器(见图 3)。文献 [6,7]报道的研究成果表明,所研制的换能器还没有最大限度地发挥材料的潜力,这方面的工作在今后一个时期内仍是水声换能器领域需要深入探索的热点问题之一。韩国 Humanscan 公司和 Medison 公司^[8]用 PMN - PT 弛豫铁电单晶材料研究了 64 路 3.5 MHz 超声探头,用于医用 B 超和 Doppler 彩色超声成像设备,暗示了弛豫铁电单晶材料在高频图像声纳中的应用前景。

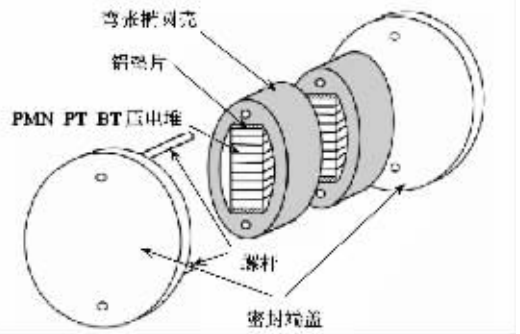


图3 PMN - PT - BT IV 型弯张换能器

2.3 压电聚合物薄膜水声换能器

压电聚合物可以制成柔性膜,制作换能器时可以设计成任意形状,并且材料的声阻抗率低,容易与水等流体介质及生物组织实现阻抗匹配,常用来制作高频标准水听器、高频换能器、医学超声换能器、共形基阵及多元化复合换能器阵等。制作换能器的常用压电聚合物主要是聚偏氟乙烯(PVDF)。目前更引人注目的压电聚合物材料薄膜 EMFi(electro-mechanical film 的缩写)是一种聚丙烯泡沫柔性薄

膜,其压电常数约是 PVDF 的 10 倍,可用来制作高灵敏度换能器^[9]。文献 [9] 研制了如图 4 所示结构的 EMFi 薄膜换能器,接收面直径为 35mm,换能器接收灵敏度大于 -190dB(参考值为 1V/ μ Pa)。这种换能器还可在空气中使用,接收或发射声波。

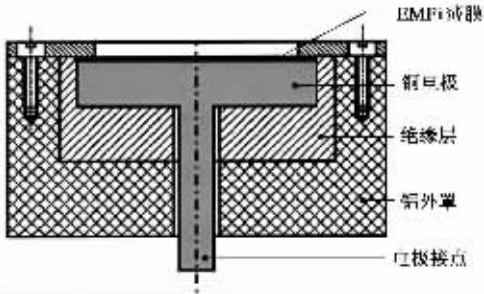


图 4 压电薄膜换能器

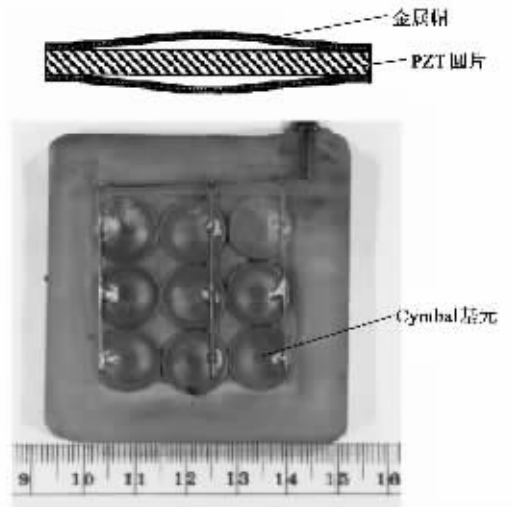


图 5 钹型换能器及 9 元基阵

3 新结构水声换能器与各种换能机理介绍

功能材料在换能器中固然重要,但是需要通过合适的结构来发挥作用,因此换能器的结构设计在换能器技术发展中显得尤其重要。根据不同的应用领域以及多方面的技术需求,或者根据不同的换能机理与功能材料的特点,相继问世了各种类型的换能器,其中不乏将多学科的技术结合起来,共同突破新的技术难点,满足某些特殊的技术需求,如图 1 所示的高温超导磁致伸缩水声换能器就是典型的例子。在本文的前述内容和后面要介绍的换能器类型中,许多也属于新结构新机理水声换能器,为了不重复,本节仅另举两个新型结构的设计实例。

3.1 新结构水声换能器

钹型(cymbal)换能器是一种类似于弯张换能器的新型结构换能器,每只钹型换能器由一个对 PZT 压电陶瓷圆片与一对金属帽粘接起来构成(见图 5),PZT 压电陶瓷圆片施加交变电压,产生径向振动激发金属帽作弯曲振动,换能器凸起的金属帽产生“胀起-缩扁”的交替振动,辐射声波。同样交变的压力波作用到金属帽上时,会将压力传递到 PZT 压电陶瓷圆片,在陶瓷片的两极输出交变电压,用作接收换能器。文献[10]报道的钹型换能器水中谐振频率为 16.1kHz,发射电压响应为 130dB(参考值为 1 μ Pa/V,1m 处),图 5 中还给出了用这种换能器组成 9 元基阵的照片。

盘曲弹簧型低频压电换能器,将压电陶瓷加工成盘曲弹簧形状(如图 6 所示),压电陶瓷沿切向极

化,然后构造激发电极对,电极对沿盘曲弹簧方向并由中间无电极的中性段隔开,形成外环电极对 1 和内环电极对 2(见图 6 中局部小片断放大示意图)。如此在电极对上加激发电压 V ,外环电极对和内环电极对所控制的部分压电陶瓷会产生彼此相反的振动(伸张或收缩),激发弹簧系统伸缩运动带动活塞工作面振动并辐射声能。由于这种结构的刚度很小,所以具有低的谐振频率,可用作低频发射换能器,同样用作接收时,在低频段也具有较高的灵敏度。文献[11]从压电方程出发,得出了这种类型换能器的机电转换关系,开展了一些探索性研究工作。

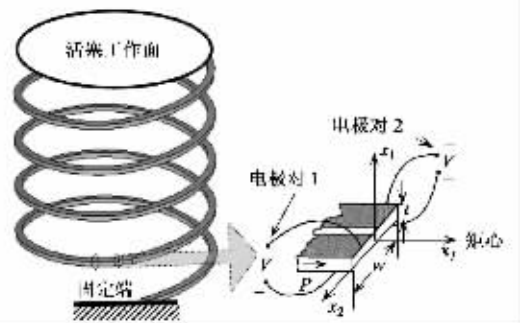


图 6 盘曲弹簧型低频压电换能器

3.2 水声换能器中的各种换能机理介绍

从能量转换角度讲,换能器主要可分为利用压电效应实现能量转换的压电换能器和利用磁致伸缩效应实现能量转换的磁致伸缩换能器,前述内容所涉及的换能器都属于这两种类型之一,它们的共同特点是基于功能材料实现能量转换。后面还要详细介绍一种基于光弹效应拾振的光纤水听器。除此之

外,在水声领域还应用其他几种类型的换能器,在此简要介绍如下:

(1) 电动式换能器,利用磁场与电流相互作用,类似于普通的扬声器,换能器辐射面与一个置于静态磁场中的线圈机械连接,当线圈流过工作信号频率的电流时,线圈受磁场力作用最终转换成辐射面的交变振荡而辐射工作信号频率的声能.这种类型的换能器具有工作频率低、动态振幅大、频带宽等优点.

(2) 机械驱动水声换能器,利用机械马达通过曲轴-连杆等一些机械结构驱动换能器活塞式辐射面作往复运动,通过改变马达的转速可调整工作频率,改变曲轴-连杆的驱动点调整往复运动的最大行程,即调整换能器辐射面的振动位移幅.这种换能器没有谐振特性,一般不太适合产生复杂声信号.

(3) 流体动力学水声换能器,利用泵系统或机械结构驱动流体产生振荡,通过工作辐射面或直接向与其连通的水域空间辐射声波.这种类型换能器可以辐射较大的声能量,也不适合用于产生复杂声信号,一般仅用于辅助实验声源.

(4) 共振管型水声换能器,设计一定内腔尺寸的管型结构,通过机械结构或其他形式的换能器激发腔内流体振荡,在腔的谐振频率下可以激发很强的线谱声信号.这种类型换能器频带窄,可用作低频声源,但体积庞大.

(5) 电火花低频声源,通过电容器储存高压电能,在水下瞬间进行火花放电,激发流体声振荡辐射声能,通过改变电压值和放电时间,对辐射声能的脉冲宽度和瞬时声强进行调整,但可控程度较弱,每次放电的频谱成分也有一定差异,其优点是瞬间能量大,可产生强大的脉冲声波.

4 宽带换能器技术

带宽特性是换能器的重要指标,换能器的带宽特性影响着传递信号的频谱特性和波形,在采用复杂形式的信号以及运用脉冲压缩等现代信号处理技术时要求换能器必须具有足够的带宽,否则将会造成信号失真或影响信号处理的效果.不夸张地说,宽带换能器是声纳信号处理技术的瓶颈,没有宽带换能器,信号处理就像一位卓越的词曲作家面对一位五音不全的歌手一样尴尬.宽带换能器如此之重要,使换能器的宽带设计成为人们长期不懈努力的科研方向之一.

换能器实现宽带的重要手段是利用多谐振模耦

合作用,如纵向换能器的纵振模-辐射头弯曲模耦合、纵向换能器的双激励振动模耦合、纵向换能器匹配层技术实现双纵振模耦合、弯张换能器葫芦式结构双弯曲模耦合、溢流式圆环换能器径向振动-液腔共振模耦合、多模共振腔耦合宽带换能器等等,这里重点介绍一下纵向宽带换能器.

纵向换能器利用多谐振模耦合实现宽带特性的典型设计如图7所示^[12].图7(a)是一种三谐振模耦合的换能器(谐振频率分别是15、25、35kHz),其中15kHz谐振频率是压电陶瓷堆激发换能器整体结构的纵向共振模,35kHz谐振频率是上端的顺性垫圈(玻璃钢材料)与上端的中间质量及铝辐射头子结构的纵向共振模,25kHz谐振频率是两个顺性垫圈(玻璃钢材料)与两个中间质量及铝辐射头子结构的纵向共振模,该换能器实现的工作带宽从13kHz到37kHz.图7(b)也是一种三谐振模耦合的换能器,与图7(a)相比,区别在于在铝辐射头前部利用树脂材料构成1/4波长的匹配层,匹配层的作用也是使整体结构反映出子结构的特征而具有多阶纵振动谐振模.在纵向宽带换能器设计中,将图7(a)或(b)结构中的顺性垫圈用功能材料代替,设计成双激励、三激励纵向宽带换能器,具有更强大的辐射能力.图7(c)是采用稀土超磁致伸缩材料与PZT混合组成的双激励宽带纵向换能器.

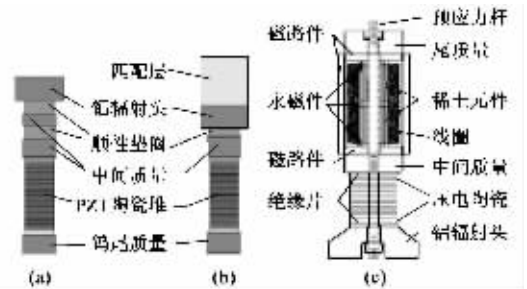


图7 多谐振模耦合纵向宽带换能器

5 新型水听器技术

用于接收水下声信号的水声换能器称作水听器,水听器包括压电型、磁致伸缩型、动圈式、压阻式等,这里主要介绍感知水下矢量信号的矢量水听器和基于光弹效应拾振的光纤水听器.

5.1 矢量水听器新技术

水下声场的矢量信息包括声压梯度、质点加速度、质点振速、质点位移等参量,对这些矢量信息进

行感知的一类水声换能器称为矢量水听器,目前矢量水听器在国内外应用已成为热门的研究方向之一^[13,14]。根据换能器与声场相互作用的方式,矢量水听器可分为双水听器型、外壳静止型、同振型等等。双水听器型比较直观,是利用一对声压水听器测量水下相距很近的两点声压差来检测声压梯度;外壳静止型如图8(a)所示,设计外壳为重质量块,连接在外壳上的敏感元件直接与声场作用,检测压差信号;同振型如图8(b)所示,通过固定框架柔性悬挂一个平均密度与水近似相等、尺度远小于工作波长的球(或柱)体,该球(或柱)体随水介质一同振动而得名“同振型”,声波不直接作用在敏感元件上,而是由惯性力转移到与内部质量块相连的敏感元件上。矢量水听器的突出特点是具有偶极子指向性(见图8),也因此有着重要的应用^[14]。

易于波分复用等特点。另外,可通过在一根光纤上刻写多个不同波长光栅的方法来实现水下多点信号的同步检测,这使得水听器成阵和网络化更加方便。

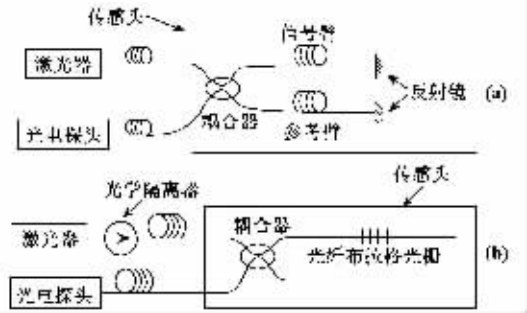


图9 光纤水听器结构及拾振原理示意图

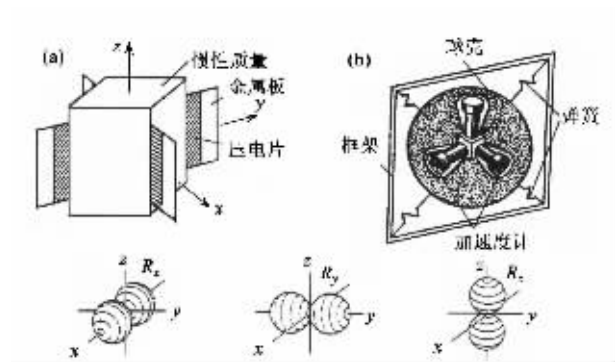


图8 矢量水听器结构及指向性示意图

5.2 光纤水听器技术

光纤水听器是一种通过检测声场中声信号引起的光纤中传播光的强度、偏振、相位等变化而感知水声信号的传感器。较常用的类型是干涉型光纤水听器。图9(a)给出一种干涉型光纤水听器的结构与拾振原理,它利用光纤相干检测技术感知声信号引起相位变化来进行水声信号探测。光纤水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰、易于成阵等特点,国内一些研究单位已经利用这种类型的光纤水听器进行海上基阵试验^[15],并研制成功三维同振球干涉型光纤矢量水听器。近些年又发展起来光纤光栅水听器[见图9(b)]。所谓光纤光栅就是采用某种技术使光纤纤芯的折射率分布沿纵向呈一定周期变化,光纤光栅水听器是以光栅的中心波长随感知声参量变化而移动为原理。目前,光纤光栅水听器一般基于光纤布拉格光栅原理实现水声信号检测。光纤光栅水听器除了具有干涉型光纤水听器的高灵敏度、不受电磁干扰、可远距离传输等特点外,还具有潜在的探头微型化、

参考文献

[1] Voccio J P, Joshi C H *et al.* IEEE Trans. Magn., 1994, 30 (4): 1693
 [2] Dubus B *et al.* Low-Frequency Magnetostrictive Projectors for Oceanography and Sonar In : 3rd European Conference on Underwater Acoustics. Heraklion : 1996, 1019 - 1024
 [3] Toshiaki N *et al.* A 20Hz Giant Magnetostrictive Source for Monitoring of Global Ocean Variability. In : International Symposium Acoustic Tomography and Acoustic Thermometry Proceedings. Tokyo : 1999, 217 - 224
 [4] Purcell C J. Terfenol Driver for the Barrel-Stave Projector. In : Proceeding of the Third International Workshop on Transducers for Sonics and Ultrasonics. Orlando Florida, 1992, 160 - 169
 [5] Mo X P *et al.* Acta Acustica, 2002, 88 : 796
 [6] Steven M P *et al.* IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 2000, 47(4) : 861 - 876
 [7] Craig L H *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104(4) : 1903
 [8] Sung M R *et al.* Multilayer PMN-PT Single Crystal Transducer for Medical Application. In : 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference 2004, 1021 - 1024
 [9] Reiner K. J. Acoust. Soc. Am., 2001, 109(4) : 1412
 [10] James F T *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1999, 105(2) : Pt. 1, 591
 [11] Jiao B L *et al.* IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 1999, 46(1) : 147
 [12] Stephen C B. High Frequency Multi-resonant Broadband Transducer Development at NUWC. In : UDT 2002 Undersea Defence Technology Conference Proceedings. Spezia, 2002, 588 - 594
 [13] 贾志富. 应用声学, 2001, 20(4) : 15 [Jia Z F. Applied Acoustics, 2001, 20(4) : 15 (in Chinese)]
 [14] Robert D C *et al.* Acoustic Velocity Sensor for the NRL ABC Research Platform. In : Acoustic Particle Velocity Sensors : Design, Performance and Applications, New York : 1995, 303 - 311
 [15] 张仁和等. 物理, 2004, 33(7) : 503 [Zhang R H *et al.* Wuli (Physics), 2004, 33(7) : 503 (in Chinese)]