

# 大深度复合同振式矢量水听器设计\*

王文龙<sup>1,2</sup>, 孙芹东<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 韩梅<sup>1,2</sup>

(1. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199; 2. 海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266235)

**摘要:**针对目前深海无人移动平台缺乏与其工作深度相匹配的复合同振式矢量水听器的问题,采用薄壁铝合金球壳作为矢量通道,压电陶瓷圆环作为声压通道,设计制作了一型大深度复合同振式矢量水听器,并用理论计算、有限元仿真和实验测试的方法对其声学性能和耐压性能进行了验证。该水听器的外径为85 mm,质量为398 g,平均密度为1 240 kg/m<sup>3</sup>,工作频段为20~3 000 Hz,矢量通道呈余弦指向性,灵敏度为-187 dB@500 Hz,声压通道无指向性,灵敏度为-191 dB@500 Hz,耐压深度为2 000 m。海上试验表明,该水听器能够搭载在水下滑翔机等深海无人平台上执行声学探测任务,在大深度声学探测领域具有重大的应用价值。

**关键词:**大深度;复合同振式矢量水听器;耐压;深海无人移动平台

**中图分类号:**TB565+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)03-149-10

## Design of large depth combined co-vibrating vector hydrophone

WANG Wenlong<sup>1,2</sup>, SUN Qindong<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>, HAN Mei<sup>1,2</sup>

(1. Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China;

2. National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that deep-sea unmanned mobile platforms lack combined vector hydrophones which match their working depth, a large depth combined co-vibrating vector hydrophone was designed and developed with the thin aluminum alloy spherical shell as its vector channel and the piezoelectric ceramic ring as its sound pressure channel. The acoustic performance and pressure resistance of the hydrophone was verified by theoretical calculation, finite element simulation and experimental test. The size of the hydrophone is  $\Phi 85$  mm, with the mass being 398 g, and the average density being 1 240 kg/m<sup>3</sup>. Its working frequency range is from 20 to 3 000 Hz. The vector channel of the hydrophone is cosine directional, and its sensitivity is -187 dB@500 Hz. The sound pressure channel has non-direction, with the sensitivity being -191 dB@500 Hz. This vector hydrophone has a working depth of 2 000 m. Sea tests show that this hydrophone can be applied on deep-sea unmanned platforms, such as underwater gliders, and can carry out acoustic detection missions, which means that it has great application values in the field of deep-sea acoustic detection.

**Keywords:** large depth; combined co-vibrating vector hydrophone; pressure-resistant; deep sea unmanned mobile platform

复合同振式矢量水听器是一种新型的水声接收换能器,它包含声压通道和矢量通道,能够同步、共点地测量介质声场中的声压标量信号和振速矢量信号。声压通道和矢量通道信号联合处理可以形成多种单边指向性,单个复合同振式矢量水听器即可进行目标方位测量<sup>[1-3]</sup>,且没有左右舷模糊问题。复合同振式矢量水听器还具有低频性能好、灵敏度高、抗各向同性噪声、体积小、功耗低等诸多优点,适合应用在水下滑翔机、剖面浮标等安静型深海无人移动平台上执行目标探测任务<sup>[4]</sup>。随着深海技术的发展,目前水下无人移动

平台的工作深度已经越来越大<sup>[5-6]</sup>,复合同振式矢量水听器的耐压水平已经成为制约其在深海无人移动平台上应用的首要因素。

在国外,美国和俄罗斯一直在致力于大深度矢量水听器的研究与应用。美国海军相关研究组织曾在1988年和2006年进行过矢量水听器的深海应用试验,水听器的最大工作深度分别为5 500 m和6 000 m<sup>[7-8]</sup>;苏联研制的矢量水听器也早在1989年就能达到3 600 m工作深度<sup>[9]</sup>。上述水听器均采用的是声压通道和矢量通道分离的方案。

\* 收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC030313);海洋科学与技术国家实验室问海计划资助项目(2017WHZZB0601)

作者简介:王文龙(1990—),男,山东莱西人,助理研究员,博士,E-mail:wilon7521@qq.com;

孙芹东(通信作者),男,讲师,硕士,E-mail:sqd2010@163.com

在国内,矢量水听器技术研究开展最早的是哈尔滨工程大学水声学院,但其对大深度矢量水听器技术的研究也是近年才开始的。2010年,哈尔滨工程大学的杨松涛分别采用黄铜耐压壳体注入硅油和环氧树脂加玻璃微珠复合材料灌封的方案制作了两型耐压矢量水听器,实验显示两型水听器均能承受 1 000 m 的水压<sup>[10]</sup>。2011年,哈尔滨工程大学的邹亮采用复合材料壳体加内部铝合金壳体的双层壳体结构制作了三种耐压矢量水听器,均能够承受 2 000 m 水压<sup>[11]</sup>。但是上述几种耐压矢量水听器都没有声压通道。2014年夏,哈尔滨工程大学在南海 3 146 m 深度成功开展了大深度矢量水听器的应用实验<sup>[12]</sup>,但未说明采用的是何种耐压方案,也未说明水听器是否内置声压通道。

不含声压通道的大深度矢量水听器在使用时,通常需要在周围布置数个声压水听器,并通过合理的空间分布使声压水听器和矢量水听器的等效声中心重合。这种方案的好处是降低矢量水听器和声压水听器结构的复杂度,可以相对容易地做到高耐压;缺点则是悬挂系统复杂,占用空间更大,不适合在小型深海无人平台上应用。为了解决这个问题,本文提出了一种大深度复合共振式矢量水听器的设计方案。

## 1 水听器总体结构

大深度复合共振式矢量水听器的结构如图 1 所示。水听器的外形选择标准球形,从声学特性来说,球形水听器的指向性具有最好的三轴一致性;从耐压设计来说,球形壳体较其他形状具有更佳的耐压性能。水听器耐压壳体由上下两个薄壁铝合金半球壳组成,两个半球壳通过各自内壁的突出结构旋转锁紧,借鉴了消防水管接头上使用的锁紧结构。两个半球壳锁紧时,球壳中间形成一圈凹槽,凹槽内安装有压电陶瓷圆环接收换能器,凹槽周围有加强支撑结构,凹槽内的剩余空间用聚氨酯材料填充,起到透声和密封的作用。三轴加速度计通过支架固定在球壳中心,信号调理电路也安装在球壳内部。电源及信号线通过水密穿仓件引出到球壳外部。球壳外表面对称分布八个弹簧悬挂孔。设计时对各个部件的质量和位置进行建模仿真,使整个矢量水听器的质心与形心相重合。

制作完成的大深度复合共振式矢量水听器样品如图 2 所示,其外径为 85 mm,体积为  $3.22 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,质量为 398 g,水听器的平均密度为

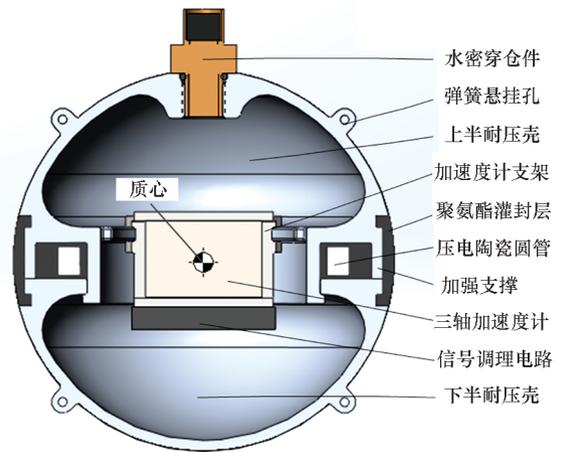


图 1 大深度复合共振式矢量水听器结构剖面图  
Fig. 1 Structural profile of the large depth combined co-vibrating vector hydrophone

$1\ 240 \text{ kg/m}^3$ 。水听器的设计耐压为 2 000 m,工作频段为 20 ~ 3 000 Hz。



图 2 大深度复合共振式矢量水听器样品  
Fig. 2 Sample of the large depth combined co-vibrating vector hydrophone

## 2 声压通道设计

声压通道采用压电陶瓷圆环作为声压敏感元件。压电陶瓷圆环换能器具有结构简单、水平面上无指向性、工作性能稳定等特点,适合作为声压接收换能器。所用压电陶瓷圆环的外径为 65 mm,厚度为 5 mm,高度为 6.5 mm,材料为 P-51 压电陶瓷,其压电系数为  $g_{33} = 25.6 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ ,  $g_{31} = -9.6 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ ,杨氏模量  $Y_{11}^E = 6.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,泊松比  $\mu = 0.36$ ,密度  $\rho_s = 7\ 600 \text{ kg/m}^3$ 。

### 2.1 声学特性分析

#### 2.1.1 谐振频率

压电陶瓷圆环作为声压信号的接收换能器,

其工作频带应该在一个灵敏度平坦的区间内,这就要求压电陶瓷圆环本身的谐振频率要远离水听器的工作频带。

压电陶瓷圆环存在径向和轴向本征频率,这两个本征频率仅与其物理尺寸和所用材料有关。假设压电圆环的外半径为  $R_o$ , 内半径为  $R_i$ , 高度为  $L$ , 则其平均半径  $a = (R_i + R_o)/2$ 。当  $2 \leq L/a \leq 5$  时, 径向本征频率和轴向本征频率耦合。当  $L/a < 2$  或  $L/a > 5$  时, 耦合程度减弱, 分裂为径向本征频率  $f_R$  和轴向本征频率  $f_L$ , 当外加频率与  $f_R$  相等时产生径向谐振, 当外加频率与  $f_L$  相等时产生轴向谐振。 $f_R$  和  $f_L$  的值根据式(1)和式(2)计算<sup>[13]</sup>。

$$f_R = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho_s}} \quad (1)$$

$$f_L = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho_s}} \quad (2)$$

大深度复合合同振式矢量水听器的声压通道所用的压电陶瓷圆环的平均半径  $a = 30$  mm, 高度  $L = 6.5$  mm, 将相关数据代入式(1)~(2)可得  $f_R = 14.9$  kHz,  $f_L = 216.1$  kHz, 所以此压电圆环的最低谐振频率是其径向本征频率, 为 14.9 kHz, 远离大深度复合合同振式矢量水听器的工作频段 20~3 000 Hz, 满足声学要求。

### 2.1.2 接收灵敏度

压电陶瓷圆环作为声压信号接收换能器安装于大深度复合合同振式矢量水听器内, 其外表面均匀受声压  $p_0$  作用, 而其上、下端面和内表面均不受声压作用, 即它的边界条件为空气背衬、端部隔离。压电陶瓷圆环接收换能器工作在远低于其本征频率的频带范围内, 其振动特性处于弹性控制状态, 将压电陶瓷圆环近似看成各向同性, 根据弹性静力学知识, 由静态平衡方程和相容条件可推导出此边界条件下压电陶瓷圆环内部应力与半径坐标  $r$  的关系为<sup>[13]</sup>

$$T_{rr} = p_0 \frac{R_i^2 R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) \quad (3)$$

$$T_{\theta\theta} = p_0 \frac{R_i^2 R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( -\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) \quad (4)$$

$$T_{zz} = 0 \quad (5)$$

$$T_{r\theta} = 0 \quad (6)$$

式(3)~(6)中应力  $T_{rr}$ 、 $T_{\theta\theta}$ 、 $T_{zz}$  和  $T_{r\theta}$  的第一个脚标表示应力的作用面垂直于哪个坐标轴, 第二个脚标表示应力的作用方向沿哪个坐标轴。

压电陶瓷圆环有三种极化方式: 径向极化、轴向极化和切向极化。在空气背衬、端面隔离的边

界条件下, 径向极化灵敏度最大, 因此本文使用的压电陶瓷圆环为径向极化, 其电极分别在压电陶瓷圆环的内外圆柱面上。根据  $g$ -型压电方程, 有

$$E_r = g_{31} T_{\theta\theta} + g_{31} T_{zz} + g_{33} T_{rr} \quad (7)$$

将空气背衬、端面隔离边界条件产生的应力分量代入式(7), 可得径向极化压电陶瓷圆环接收换能器的开路电压接收灵敏度为<sup>[13]</sup>

$$\left| \frac{V}{p_0} \right| = \left| \frac{\int_a^b E_r dr}{p_0} \right| = R_o \left( \frac{1 - \tau}{1 + \tau} g_{33} + g_{31} \right) \quad (8)$$

式中,  $V$  为两极间的电势差,  $\tau = R_i/R_o$ , 将压电陶瓷圆环接收换能器的相关数据代入式(8), 可得其开路电压接收灵敏度为  $2.43 \times 10^{-4}$  V/Pa, 将其换算为分贝形式, 得到大深度复合合同振式矢量水听器声压通道的声压灵敏度为  $-192.3$  dB (0 dB 参考值为 1 V/ $\mu$ Pa)。

## 2.2 耐压性能分析

大深度复合合同振式矢量水听器的设计耐压为 20 MPa, 压电陶瓷圆环接收换能器位于刚性耐压球壳外表面的凹槽内, 虽然其外面灌封有聚氨酯层, 但聚氨酯是柔性非承压材料, 即压电陶瓷圆环要直接承受 20 MPa 的外部静水压, 因此其耐压设计至关重要。

### 2.2.1 理论计算

在压力容器耐压分析中, 若压力容器壳体为旋转壳体(如圆柱壳或球壳), 令其外径与内径之比  $K = D_o/D_i$ , 当  $K \leq 1.2$  时, 认为是薄壁容器; 当  $K > 1.2$  时, 认为是厚壁容器<sup>[14]</sup>。

对于受外压作用的薄壁圆柱壳体, 其失效形式主要为强度失效和稳定性失效。

根据旋转薄壳体无力矩理论, 在外压  $p$  的作用下, 薄壁圆柱壳体会产生轴向压应力  $\sigma_z$  和环向压应力  $\sigma_\theta$ , 可认为这两种应力沿壁厚均匀分布。不管圆柱壳体两端封头的形状如何, 外压  $p$  作用在圆柱壳体横截面上的合力  $F_z$  都可表示为  $F_z = p \cdot \pi R_o^2$ 。因为壳体较薄, 圆柱壳体的横截面积  $S_z \approx 2\pi R_o \delta$ , 其中  $\delta$  为圆柱壳体厚度。则轴向压应力  $\sigma_z$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma_z = \frac{F_z}{S_z} = \frac{p R_o}{2\delta} \quad (9)$$

在长度为  $L$  的一段圆柱壳体上, 外压  $p$  作用在壳体轴平面内的合力  $F_\theta$  可以表示为  $F_\theta = p \cdot 2\pi R_o L$ 。圆柱壳体轴平面的面积  $S_\theta = 2L\delta$ 。则环向压应力  $\sigma_\theta$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma_{\theta} = \frac{F_{\theta}}{S_{\theta}} = \frac{pR_o}{\delta} \quad (10)$$

可见环向压应力  $\sigma_{\theta}$  是轴向压应力  $\sigma_z$  的 2 倍,因此对圆柱壳体强度起决定作用的是环向压应力  $\sigma_{\theta}$ 。根据最大主应力理论,设计时其环向压应力  $\sigma_{\theta}$  不应超过材料的许用应力。

外压圆柱壳体另一种失效形式为稳定性失效。对于外径为  $D_o$ 、厚度为  $\delta$ 、长度为  $L$  的外压圆柱壳体,临界长度  $L_e = 1.17D_o \sqrt{D_o/\delta}$ ,则称  $L \leq L_e$  的圆柱壳体为短圆柱壳体, $L > L_e$  的为长圆柱壳体<sup>[14]</sup>。对于短圆柱壳体,其临界失稳压力  $p_{cr}$  可用拉默公式计算<sup>[14]</sup>

$$p_{cr} = \frac{2.59Y_{11}^E \left(\frac{\delta}{D_o}\right)^{2.5}}{\frac{L}{D_o}} \quad (11)$$

外压短圆柱壳体的周向失稳许用临界压力为

$$[p] = \frac{p_{cr}}{m} \quad (12)$$

其中, $m$  为稳定安全系数,我国标准 GB 150.3 规定  $m = 3.0$ 。

压电陶瓷圆环的  $K = 1.18$ ,其长短圆管临界长度  $L_e = 274 \text{ mm}$ ,因此该压电陶瓷圆管是薄壁短圆柱壳体。压电陶瓷圆环所用材料 P-51 的常温许用应力为 137.9 MPa。将相关数据代入式(10),可得其强度失效许用压力  $p \leq 21.2 \text{ MPa}$ ,能够满足 20 MPa 耐压要求。将数据代入式(11)、式(12),计算得其周向失稳临界压力  $p_{cr} = 2550.3 \text{ MPa}$ ,周向失稳许用压力  $[p] = 850.1 \text{ MPa}$ 。可见该压电陶瓷圆环的周向失稳许用压力远大于其强度失效许用压力,若圆环外部的压力持续增大,最先发生的是强度失效。

### 2.2.2 有限元仿真

对压电陶瓷圆环进行三维建模,并使用有限元仿真软件 ANSYS Workbench 对其进行结构静力和特征值屈曲分析,以检验该压电陶瓷圆环的结构强度和稳定性能否满足耐压要求。

首先在压电陶瓷圆环外表面加载 20 MPa 的压力载荷,对其进行结构静力分析。仿真结果如图 3 所示,压电陶瓷圆环的应力强度分布沿半径从外到内逐渐增大,其内壁的应力最大,为 135.3 MPa,没有超过材料的常温许用应力,故其受 20 MPa 外压时,不会发生强度失效。

接下来将压电陶瓷圆环外表面的压力载荷改为 1 MPa,并在结构静力分析结果的基础上进行

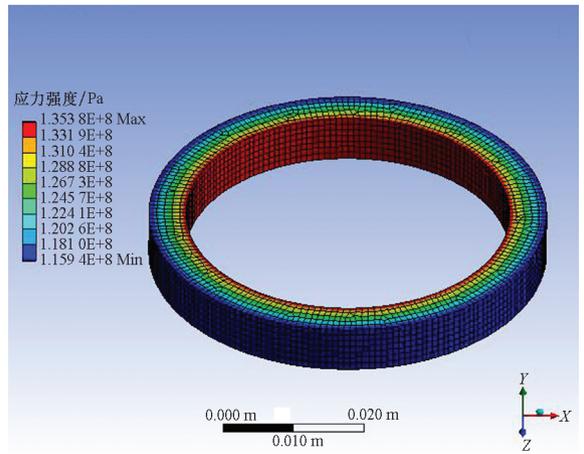


图 3 压电圆环结构静力仿真结果  
Fig. 3 Static structural simulation result of the piezoelectric ring

特征值屈曲分析。压电陶瓷圆环第一阶屈曲模态的形变如图 4 所示。第一阶屈曲载荷因子为 3 646.4,故其第一阶临界载荷为 3 646.4 MPa。即仿真得到的压电陶瓷圆环临界失稳压力为 3 646.4 MPa,高于其计算得到的临界失稳压力 2 550.3 MPa。

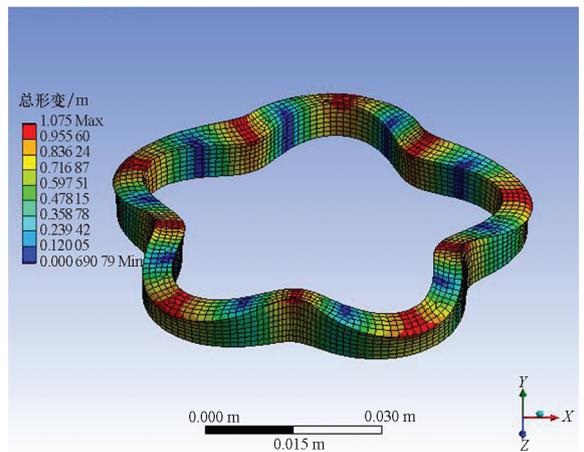


图 4 压电圆环特征值屈曲仿真结果  
Fig. 4 Eigenvalue buckling simulation result of the piezoelectric ring

由仿真结果可见,大深度复合振荡式矢量水听器的声压通道能够承受 20 MPa 的静水压力而不发生强度失效,稳定性失效则更难发生。

## 3 矢量通道设计

大深度复合振荡式矢量水听器在水下声场中工作时,其整个球形壳体作为声学矢量信号的接收器,会与声场中介质质点发生同相同速的振动。水听器内部的三轴加速度计能够测量该振动,并以 X、Y、Z 三轴分量的形式输出。所用压电加速

度计的工作频段为 20 ~ 3 000 Hz。

### 3.1 声学特性分析

同振球形矢量水听器在水下声场中工作时,会受到声场的作用力而发生振动,设其振速为  $v$ ,而声场中未放入水听器时原水听器几何中心位置处的介质质点振速为  $v_0$ ,则它们之间存在如下关系<sup>[15]</sup>

$$\frac{v}{v_0} = \frac{3e^{-j\varphi}}{\sqrt{\left(2\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} + 1\right)^2 + \left(2\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} + 1\right)(kr)^2 + \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_0}\right)^2(kr)^4}} \quad (13)$$

式中,  $\rho_0$  为声场介质的密度,  $\bar{\rho}$  为同振式矢量水听器的平均密度,  $r$  为水听器的半径, 波数  $k = \omega/c$ 。  $\varphi$  为  $v$  比  $v_0$  超前的相位角, 有<sup>[15]</sup>

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - kr + \arctan \left[ \frac{[(kr)^2 - 2]\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} - 1}{kr\left(2\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} + 1\right)} \right] \quad (14)$$

大深度复合振荡式矢量水听器的半径为 42.5 mm, 平均密度为 1 240 kg/m<sup>3</sup>, 与水的密度比为 1.24, 将其代入式(13)、式(14)可得矢量水听器振速幅值与介质振速幅值之比  $|v/v_0|$  以及它们的相位差  $\varphi$  与声波频率  $f$  的关系, 如图 5 所示。

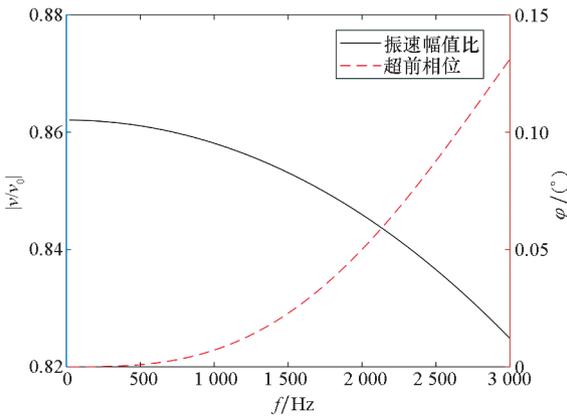


图5  $|v/v_0|$  和  $\varphi$  与  $f$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $|v/v_0|$ ,  $\varphi$  and  $f$

由图 5 可见, 在大深度复合振荡式矢量水听器所用加速度计的工作频带内, 水听器振速比介质振速超前的相位小于 0.14°; 水听器振速与介质振速比的幅值随频率的上升而下降。在 20 Hz 时,  $|v/v_0| = 0.8621$ , 相当于使振速灵敏度降低了 -1.29 dB; 在 3 000 Hz 时,  $|v/v_0| = 0.8248$ , 相当于使振速灵敏度降低了 -1.67 dB。在工作频段内变动 0.38 dB, 可以接受。

复合振荡式矢量水听器矢量通道的振速灵敏度为  $M_v$ , 但通常用等效自由场声压灵敏度  $M_p$  来

表示,  $M_v$ 、 $M_p$  与水听器内部加速度计的加速度灵敏度  $M_a$  有如下关系

$$M_p = \frac{1}{\rho c} M_v = \left| \frac{v}{v_0} \right|_{\omega} \frac{\omega}{\rho c} M_a \quad (15)$$

其中,  $\rho$  为介质密度,  $c$  为介质中的声速,  $\omega$  为声波角频率。  $|v/v_0|_{\omega}$  由式(13)求得, 其取值如图 5 中黑色实线所示。水听器中所用加速度计在工作频段的标称加速度灵敏度  $M_a = 2\ 840$  mV/g, 则根据式(15)可得到矢量水听器的理论等效声压灵敏度曲线如图 6 所示, 图中黑色实线是以 V/Pa 为单位的灵敏度曲线, 而红色虚线是换算成 dB 的灵敏度曲线。在 500 Hz 处, 矢量水听器矢量通道的理论等效声压灵敏度为 -185.6 dB。

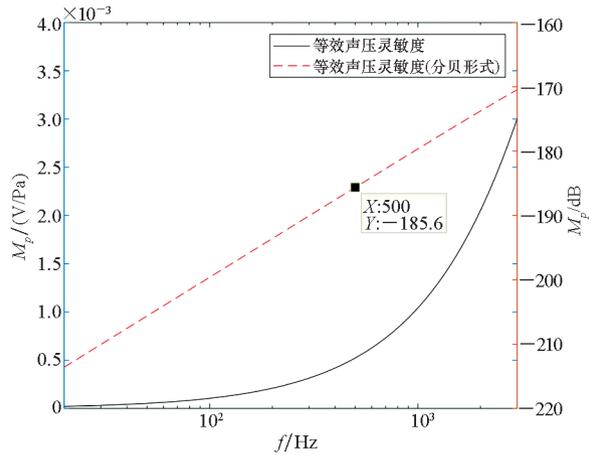


图6 矢量通道等效声压灵敏度与频率的关系

Fig. 6 Relationship between the equivalent sound pressure sensitivity of vector channel and frequency

### 3.2 耐压性能分析

大深度复合振荡式矢量水听器矢量通道由薄壁铝合金球壳承受外界静水压。球壳的外半径为 42.5 mm, 壁厚为 2.5 mm, 材质为 7075T6 铝合金。

#### 3.2.1 理论计算

根据旋转薄壳的无力矩理论, 当薄壁球壳受外压作用时, 会产生轴向压应力  $\sigma_z$  和环向压应力  $\sigma_\theta$ 。球壳的几何形状相对球心是对称的, 所以  $\sigma_z$  和  $\sigma_\theta$  在数值上相等。在通过球心的截面上, 外压  $p$  对球壳截面的合力  $F_s = p \cdot \pi R_0^2$ 。当球壳较薄时, 壳体材料的横截面积  $S_s = 2\pi R_0 \delta$ , 其中  $\delta$  为壳体厚度。因此外压球壳的轴向压应力  $\sigma_z$  和环向压应力  $\sigma_\theta$  为<sup>[14]</sup>

$$\sigma_z = \sigma_\theta = \frac{F_s}{S_s} = \frac{pR_0}{2\delta} \quad (16)$$

外压球壳设计时其强度失效许用应力  $[\sigma]$  要满足

$$\sigma_z = \sigma_\theta = \frac{pR_0}{2\delta} \leq [\sigma] \quad (17)$$

对于受外压的球壳结构,根据小变形理论推导可得其临界失稳压力为<sup>[14]</sup>

$$p_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3} \times (1 - \mu^2)} \left( \frac{\delta}{R_o} \right)^2 \quad (18)$$

式(18)计算较为简单,但是有较大误差,可以用较大的安全系数予以弥补。根据 GB 150.3,稳定安全系数取  $m = 14.52$ 。外压球壳的失稳许用临界压力为

$$[p] = \frac{p_{cr}}{m} \quad (19)$$

将大深度复合振荡式矢量水听器的耐压结构近似为理想球壳,其属于旋转薄壁壳体。当受外压作用时,会发生强度失效和稳定性失效。水听器耐压球壳的外半径  $R_o = 42.5 \text{ mm}$ ,厚度  $\delta = 2.5 \text{ mm}$ ,球壳所用材质 7075T6 铝合金的抗拉强度  $R_m = 570 \text{ MPa}$ ,常温屈服强度  $R_{el} = 505 \text{ MPa}$ ,根据我国标准 GB 150.3,对铝合金材料的抗拉强度,安全系数取 3.0,对常温屈服强度,安全系数取 1.5,因此其许用应力为  $[\sigma] = 190 \text{ MPa}$ 。将数据代入式(17),可得强度失效许用压力  $p \leq 22 \text{ MPa}$ 。

接下来考虑稳定性失效。7075T6 铝合金材料的泊松比  $\mu = 0.3$ ,杨氏模量  $E = 7.1 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,稳定系数取  $m = 14.52$ 。将数据代入式(18)和式(19),计算得其周向失稳临界压力  $p_{cr} = 297.4 \text{ MPa}$ ,其周向失稳许用压力  $[p] \leq 20.48 \text{ MPa}$ 。

由理论计算结果可见,该大深度复合振荡式矢量水听器的铝合金球壳结构能够耐受 20 MPa 外压而不发生强度失效和稳定性失效。

### 3.2.2 有限元仿真

上述铝合金球壳的耐压计算适用于理想球壳,而大深度复合振荡式矢量水听器的球壳中央存在凹槽,且上半球壳为安装水密穿仓件设有螺纹通孔,这都会导致其耐压性能下降。为进一步验证水听器的耐压能力,对其进行结构静力仿真和特征值屈曲仿真。

首先在水听器球壳外表面施加 20 MPa 压力载荷,对其进行结构静力分析,仿真结果如图 7 所示。可见球壳的大部分位置应力强度不超过 187 MPa,未超出材料的许用应力;在靠近中央凹槽的内壁上下各有一条窄带应力较大,不超过 280 MPa,该处应力属于一次应力加二次应力,在数值上小于 3 倍的设计应力强度,满足设计要求;只有在中央凹槽周围分布的加强支撑处有些局部

应力集中,属于一次应力加二次应力加峰值应力,主要会对耐压壳体的疲劳失效产生一定影响。仿真分析可见,球壳中央的凹槽确实会使球壳的耐压性能下降。

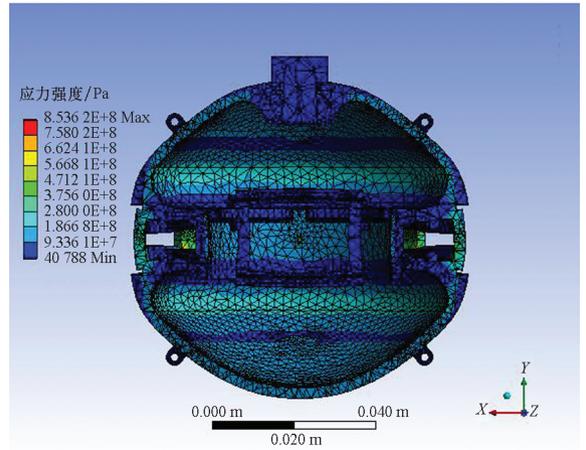


图 7 水听器球壳结构静力仿真结果

Fig. 7 Static structural simulation result of the hydrophone spherical shell

接下来将水听器球壳外表面施加的压力载荷改为 1 MPa,并在结构静力分析结果的基础上进行特征值屈曲分析。水听器球壳第一阶屈曲模态的形变如图 8 所示。第一阶屈曲载荷因子为 286.96,故其第一阶临界载荷为 286.96 MPa。因此,仿真得到的水听器球壳的临界失稳压力为 286.96 MPa,与计算得到的周向失稳临界压力 297.4 MPa 基本吻合。

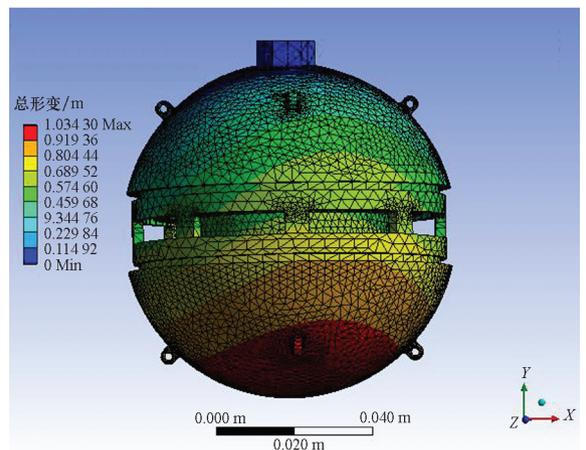


图 8 水听器球壳特征值屈曲仿真结果

Fig. 8 Eigenvalue buckling simulation result of the hydrophone spherical shell

由仿真结果可见,大深度复合振荡式矢量水听器耐压壳体承受 20 MPa 的静水压力不会发生强度失效和稳定性失效,该结论可以通过压力实验进一步验证。

### 4 水听器性能测试

为标定大深度复合振荡式矢量水听器的各项性能,采用驻波管声学标定系统对水听器样品进行灵敏度和指向性测试,采用压力釜对其进行静压力测试。矢量水听器在驻波管内进行声学特性测试的现场如图9所示。



图9 矢量水听器驻波管测试现场

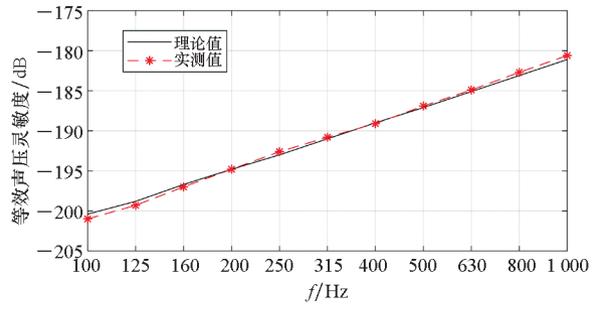
Fig.9 Acoustic test of vector hydrophone in standing-wave tube

#### 4.1 灵敏度测试

矢量水听器灵敏度采用驻波管比较法测试。将矢量水听器和标准水听器悬挂于驻波管内,使矢量水听器的待测通道坐标轴平行于驻波管中轴线并指向发射换能器,改变发射频率,同时记录矢量水听器待测通道和标准水听器的输出电压,通过比较得到矢量水听器待测通道灵敏度。

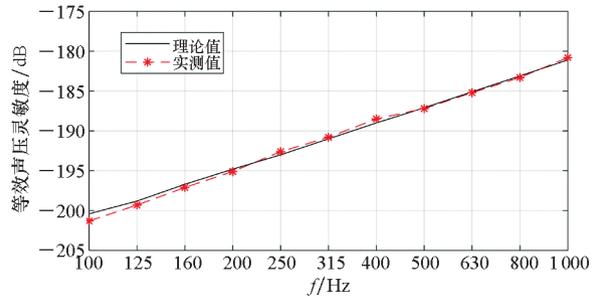
实验所用驻波管声学标定系统的工作频段为100~1 000 Hz。矢量水听器内部的信号调理电路包含前放,四个通道的前放增益在整个测试频段内均为19.8 dB,相位差在2°以内,为了便于与理论值比较,测试结果已去掉了前放增益。大深度复合振荡式矢量水听器各通道的等效声压灵敏度曲线实测结果如图10所示。三个矢量通道灵敏度的实测曲线与理论曲线基本一致。在500 Hz处X通道的灵敏度为-186.9 dB,Y通道为-187.2 dB,Z通道为-187.8 dB。测量频带内各矢量通道灵敏度一致性误差不超过1.3 dB;灵敏度级不稳定性小于1 dB;每倍频程灵敏度增加6 dB,与理论相吻合。P通道的灵敏度为-191.0 dB@500 Hz,与理论值基本吻合,测试频

带内灵敏度起伏小于1.6 dB。



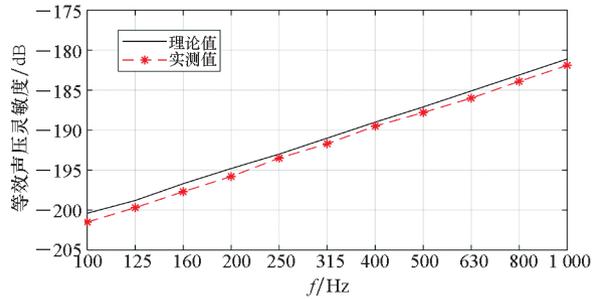
(a) X 通道

(a) X channel



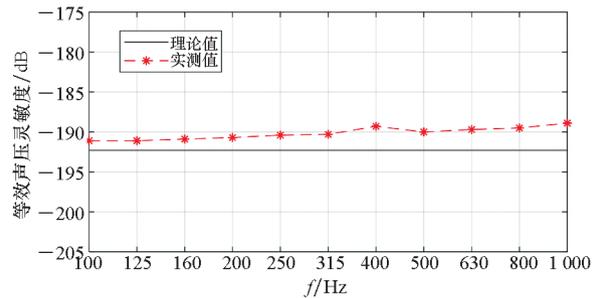
(b) Y 通道

(b) Y channel



(c) Z 通道

(c) Z channel



(d) P 通道

(d) P channel

图10 各通道灵敏度理论值与实测值

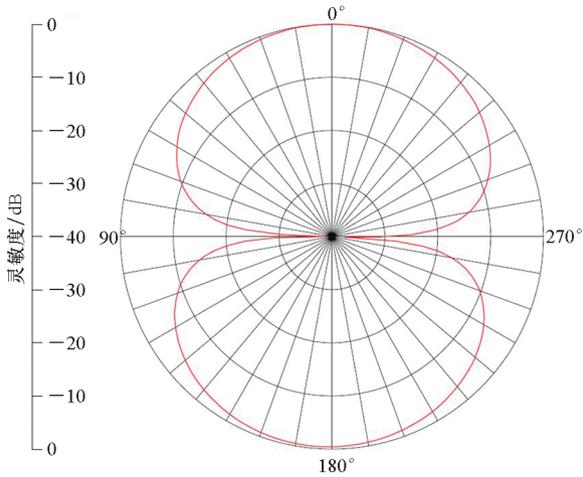
Fig.10 Theoretical and measured sensitivity of each channels

#### 4.2 指向性测试

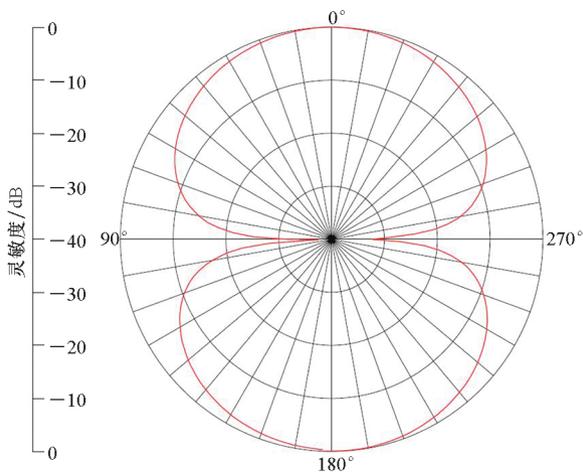
测量矢量通道指向性时,将矢量水听器悬挂于驻波管中的垂直旋转框架内,使待测通道的坐

标轴平行于驻波管中轴线并指向发射换能器,保持发射换能器输出功率和频率一定,用旋转装置将矢量水听器在垂直面上旋转一周并记录下不同旋转角度值对应的待测通道输出电压值,最后做归一化处理并用对数形式表示,即可得到该频点处待测通道的指向性曲线。测量声压通道的指向性时,先使声压通道压电陶瓷圆环所在平面垂直于驻波管中轴线,然后将矢量水听器在垂直面上旋转一周并记录声压通道输出电压;再让压电圆环所在平面平行于驻波管中轴线,然后旋转水听器并记录声压通道输出电压。

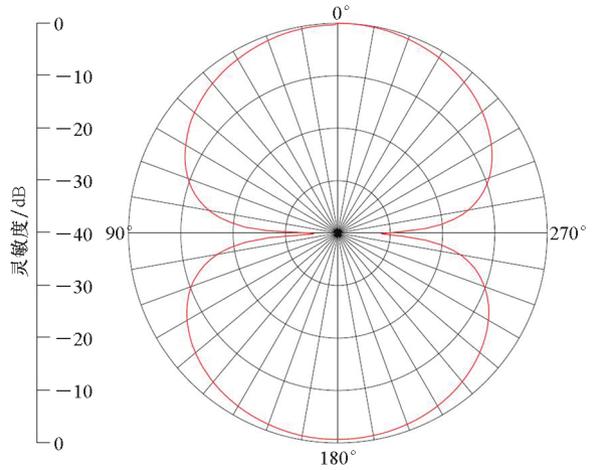
理论上复合同振式矢量水听器的矢量通道均应具有与频率无关的余弦指向性,而声压通道应该无指向性。实验分别测试了 X、Y、Z、P 通道在 100 Hz、500 Hz、1 000 Hz 频点处的指向性,限于篇幅,只给出 500 Hz 频点处 X、Y、Z、P 通道的指向性曲线,如图 11 所示。指向性测试的采样角度间隔为  $0.4^\circ$ 。



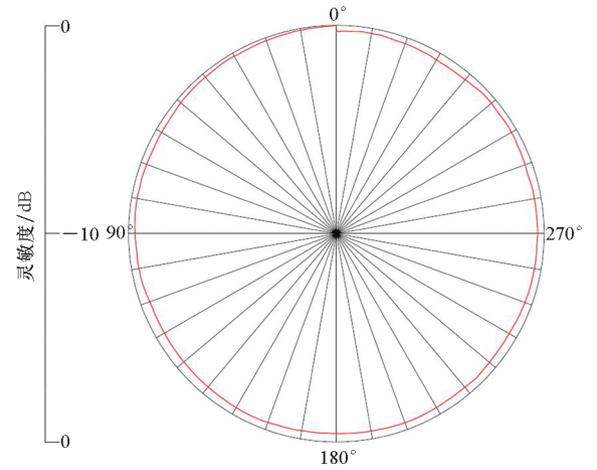
(a) X 通道  
(a) X channel



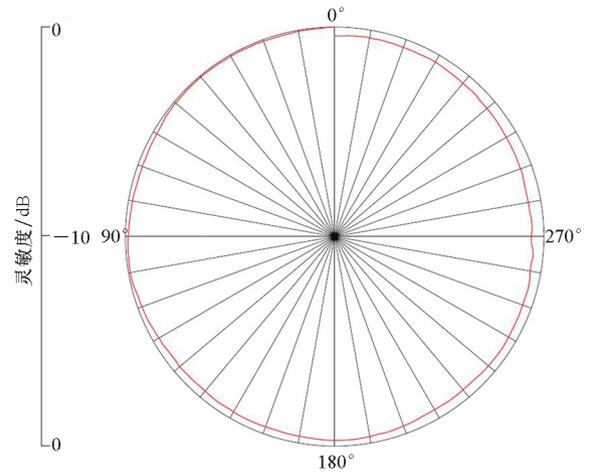
(b) Y 通道  
(b) Y channel



(c) Z 通道  
(c) Z channel



(d) P 通道平行于驻波方向  
(d) P channel is parallel to the direction of the sound wave



(e) P 通道垂直于驻波方向  
(e) P channel is perpendicular to the direction of the sound wave

图 11 各通道指向性(500 Hz)

Fig. 11 Directivity of each channel(500 Hz)

由图 11 可见,X 通道指向性曲线的凹点深度

为  $-38.6$  dB; Y 通道的凹点深度为  $-37.5$  dB; Z 通道的凹点深度为  $-35.5$  dB; 由于旋转框架连续运动, 在凹点时的声学接收信号极小, 回转系统的机械振动很容易产生超过声学信号的干扰信号, 因此测量得到的凹点深度通常小于实际值。即便如此, 三个矢量通道中最小的凹点深度也达到了  $-35.5$  dB。图 11(d) 为水听器声压通道所在平面垂直于驻波管中轴线时 P 通道的指向性曲线, 为标准圆形, 最大偏差为  $0.6$  dB, 符合压电圆环接收换能器水平方向无指向性的特点; 图 11(e) 为水听器声压通道所在平面平行于驻波管中轴线时 P 通道指向性曲线, 也是标准圆形, 最大偏差为  $0.5$  dB, 可见此时压电圆环接收换能器在其垂直方向也无指向性。两个方向测试结果综合, 可知被测水听器声压通道在空间全方位无指向性。

经测试, 与  $500$  Hz 频点的结果相似, 在  $100$  Hz 和  $1000$  Hz 频点处 X、Y、Z 通道也均具有良好的余弦指向性, P 通道也是在空间全方向无指向性。在  $100$  Hz 处, X 通道指向性曲线的最小凹点深度为  $-41.9$  dB, Y 通道的最小凹点深度为  $-38.8$  dB, Z 通道的最小凹点深度为  $-48.9$  dB, P 通道的最大凹点深度为  $-0.6$  dB; 在  $1000$  Hz 处, X 通道指向性曲线的最小凹点深度为  $-35.2$  dB, Y 通道的最小凹点深度为  $-42.2$  dB, Z 通道的最小凹点深度为  $-33.1$  dB, P 通道的最大凹点深度为  $-1.3$  dB (此处的最小、最大是就绝对值而言)。

### 4.3 耐压性能测试

为实际检验大深度复合振荡式矢量水听器的耐压能力, 在青岛海洋科学与技术国家实验室的压力釜内对 2 个大深度水听器样品进行静压力测试。测试时, 先匀速加压到  $20$  MPa, 保压  $1$  h, 泄压, 再次加压到  $20$  MPa, 如此循环 3 次。整个加压过程压力釜内没有发生明显压降。加压前后 2 个水听器样品称重一致, 外观无损伤。压力测试后, 在驻波管声学标定系统对水听器样品进行复测, 测试结果显示水听器压力测试后工作正常, 其灵敏度和指向性与压力测试前基本一致。证明该矢量水听器能够耐受  $2000$  m 水压。

### 4.4 海上试验

本文设计的大深度复合振荡式矢量水听器搭载在水下滑翔机上进行了深潜和目标探测试验。受试验海区深度限制, 在第一次试验中, 水下滑翔机下潜深度设定为  $1200$  m, 水听器在整个锯齿状

滑行剖面中 8 次到达  $1150$  m 深度; 在第二次试验中, 水下滑翔机下潜深度设定为  $1000$  m, 此次试验矢量水听器跟随水下滑翔机平台连续工作 5 昼夜时间, 共航行了 56 个剖面, 其中 17 个剖面达到或接近  $1000$  m 深度。两次试验过程中大深度复合振荡式矢量水听器工作稳定, 实现了对声学目标的方位探测和跟踪。

图 12 为水下滑翔机搭载大深度矢量水听器进行声学目标探测试验获取的目标噪声信号估计方位历程图, 该目标为配合试验的“海力号”科考船 (船长  $50$  m, 船宽  $12$  m, 吃水  $2.8$  m)。图 12 中红色实线为科考船相对水下滑翔机的推算方位曲线, 其中科考船位置通过船载卫星定位获得, 水下滑翔机位置则是通过入水点和出水点卫星定位和时间推算得到。在该时间段内目标船与水下滑翔机的相对位置如图 13 所示。

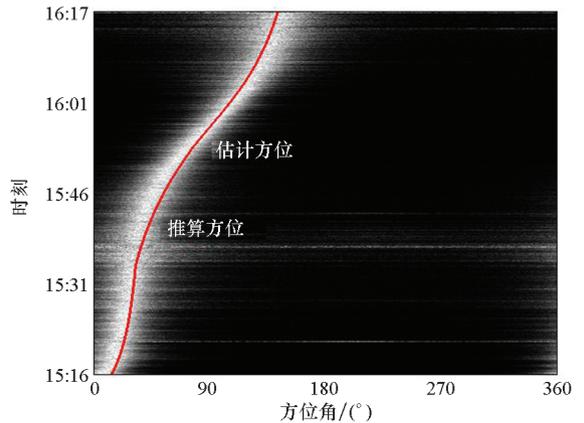


图 12 目标船噪声信号估计方位历程图

Fig. 12 Bearing time recordings of surface ship noise

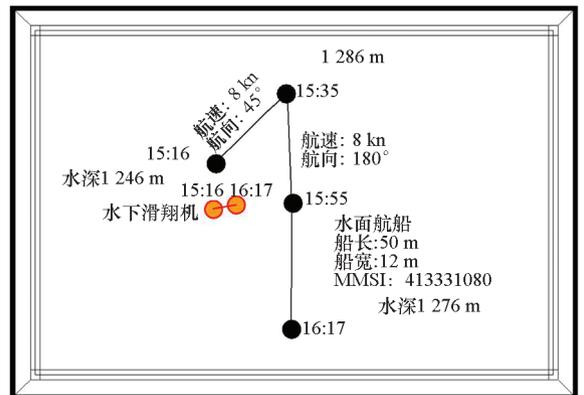


图 13 目标船与水下滑翔机相对位置态势

Fig. 13 Relative positional situation of glider and surface vessel

科考船在  $15:16 \sim 15:35$  间以  $8$  kn 航速、 $45^\circ$  航向匀速航行, 在  $15:35 \sim 16:17$  间以  $8$  kn 航速、 $180^\circ$  航向匀速航行。水下滑翔机在  $15:16 \sim$

16:17间以 20°的俯冲角斜向前下方运动,由深度 55 m 下潜至 449 m。试验过程中科考船与水下滑翔机的最近距离约为 2.5 km,最远距离约为 6.5 km。此次试验期间约为 3 级海况,实测海洋环境噪声谱级为 52 dB@1 kHz。试验结果表明,搭载在水下滑翔机上的大深度矢量水听器对 8 kn 航速的“海力号”科考船的声学探测距离不小于 6.5 km。

## 5 结论

本文采用带凹槽的薄壁铝合金球壳作为矢量通道,采用压电陶瓷圆环作为声压通道,设计了大深度复合共振式矢量水听器,经压力实验验证其能够达到 2 000 m 耐压深度,海上试验表明该水听器可以搭载在深海无人平台上执行声学目标探测任务。

本文提出的大深度复合共振式矢量水听器的设计方案对其他大深度声学传感器的设计具有借鉴意义。需要注意的是,对于复合共振式矢量水听器,由于声压通道需要与水听器外壳融合组装,必然会对水听器壳体的耐压结构造成影响,所以本文提出的设计方案具有一定的局限性,继续增大耐压深度的难度较大。

## 参考文献 (References)

[1] 笄良龙,王文龙,孙芹东,等. 一种微型矢量水听器姿态测量系统[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 20-25.  
DA Lianglong, WANG Wenlong, SUN Qindong, et al. Miniaturized attitude measurement system of vector hydrophone[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 20-25. (in Chinese)

[2] 张维,尚玲. 单矢量水听器水中多目标方位跟踪方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 114-119.  
ZHANG Wei, SHANG Ling. Method of direction of arrival tracking for multiple targets under water with single vector hydrophone[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(2): 114-119. (in Chinese)

[3] 马伯乐,朱世强,孙贵青. 基于特征值的单矢量水听器目标检测算法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 96-100.  
MA Bole, ZHU Shiqiang, SUN Guiqing. Single vector hydrophone target detection based on eigenvalue[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 96-100. (in Chinese)

[4] 王文龙,王超,韩梅,等. 矢量水听器在水下滑翔机上的应用研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2580-2586.  
WANG Wenlong, WANG Chao, HAN Mei, et al. Research on application of vector hydrophone onboard an underwater glider[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(12): 2580-

2586. (in Chinese)

[5] 王树新,宋扬,王延辉,等. 基于 Sobol'法的 Petrel-II 水下滑翔机能耗参数灵敏度分析[J]. 天津大学学报, 2017, 50(2): 113-120.  
WANG Shuxin, SONG Yang, WANG Yanhui, et al. Sensitivity analysis of energy consumption parameters for Petrel-II underwater glider based on sobol' method[J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50(2): 113-120. (in Chinese)

[6] 卢少磊,孙朝辉,刘增宏,等. COPEX 和 HM2000 与 APEX 型剖面浮标比测试验及资料质量评价[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(1): 84-92.  
LU Shaolei, SUN Chaohui, LIU Zenghong, et al. Comparative testing and data quality evaluation for COPEX, HM2000 and APEX profiling buoys[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(1): 84-92. (in Chinese)

[7] ADAIR R G, ORCUTT J A, FARRELL W E. Infrasonic seismic and acoustic measurements in the deep ocean[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1988, 13(4): 256-283.

[8] MCEACHERN J F, MCCONNELL J A, JAMIESON J J, et al. ARPA-deep ocean vector sensor research array[C]// Proceedings of IEEE OCEANS, 2006.

[9] SHCHUROV V A. Coherent and diffusive fields of underwater acoustic ambient noise[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(2): 991-1001.

[10] 杨松涛. 深水矢量水听器的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
YANG Songtao. The research of deep-water vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)

[11] 邹亮. 耐压矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
ZOU Liang. The research of the pressure-resistant vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)

[12] 徐传秀,朴胜春,张海刚,等. 大深度矢量水听器用于深海声传播测量的实验研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2016, 46(9): 37-43.  
XU Chuanxiu, PIAO Shengchun, ZHANG Haigang, et al. Experimental study of sound propagation using a deep-water vector hydrophone[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(9): 37-43. (in Chinese)

[13] 周福洪. 水声换能器及基阵[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.  
ZHOU Fuhong. Underwater acoustic transducer and array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984. (in Chinese)

[14] 压力容器实用技术丛书编写委员会. 压力容器设计知识[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Writing Committee of Pressure Vessel Practical Techniques Series. Knowledge of pressure vessel design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)

[15] 陈洪娟. 矢量传感器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.  
CHEN Hongjuan. Vector sensor[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2006. (in Chinese)