

◇ 研究报告 ◇

基于球形压电陶瓷的耐压水听器

王文龙^{1,2} 笄良龙^{1,2†} 尹航²

(1 海军潜艇学院 青岛 266199)

(2 海洋科学与技术国家实验室 青岛 266237)

摘要: 利用球形压电陶瓷自身所具有的耐压能力,采用径向极化空气背衬压电球壳换能器作为声学接收敏感元件,设计并制作了一种球形耐压水听器。首先对其低频开路接收灵敏度和谐振频率等声学特性进行了分析和有限元仿真,然后对其强度和稳定性等耐压性能进行了分析和有限元仿真,最后对其声学性能和耐压能力进行了测试。测试表明,该球形耐压水听器的直径为 36 mm,工作频段为 50 Hz~10 kHz,低频接收灵敏度为 -198.4 dB (0 dB=1 V/ μ Pa),等效自噪声谱级为 46.5 dB@1 kHz,其耐压深度可达 3000 m。该耐压水听器为大深度水听器设计提供了参考,在深水声学领域具有重要的应用价值。

关键词: 压电球壳;耐压;水听器

中图法分类号: TB565+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)02-0268-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.02.014

Pressure-resistant hydrophone based on piezoelectric ceramic spherical shell

WANG Wenlong^{1,2} DA Lianglong^{1,2} YIN Hang²

(1 Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

(2 National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Based on the pressure resistance of piezoelectric ceramic spherical shell itself, a pressure-resistant hydrophone was designed and fabricated by using radially poled air backing piezoelectric ceramic spherical shell transducer as acoustic sensitive element. Firstly, the acoustic characteristics such as low frequency open circuit receiving sensitivity and vibration frequency were analyzed, and simulated by finite element method. Then the pressure-resistant performance such as strength and stability were analyzed, also simulated with FE software. Finally, its acoustic performance and pressure resistance were tested. Test results show that the diameter of the pressure-resistant hydrophone is 36 mm, and its working frequency range is from 50 Hz to 10 kHz. The low frequency pressure sensitivity is -198.4 dB (0 dB ref 1 V/ μ Pa), the noise spectrum level is 46.5 dB at 1 kHz, and its working depth is 3000 m. This pressure-resistant hydrophone provides a reference for the design of deep water hydrophones and has important application value in the field of deep water acoustics.

Keywords: Piezoelectric ceramic spherical shell; Pressure-resistant; Hydrophone

2019-05-08 收稿; 2019-10-11 定稿

作者简介: 王文龙 (1990-), 男, 山东莱西人, 博士研究生, 研究方向: 水声换能器。

† 通信作者 E-mail: wilon7521@qq.com

0 引言

进入21世纪以来,深海的研究和开发获得了越来越多的关注,已经成为各国竞争的热点领域,而耐压水听器则是深海开发不可缺少的设备。此外,随着各国军事技术的快速发展,各种水下装备如潜艇、鱼水雷、水下无人机(UUV)、水下滑翔机(UUG)、水下机器人(ROV)、潜标等的工作深度越来越大,这些深水装备通常需要配备能够满足其工作深度的耐压水听器。

为了承受高静水压力的作用,耐压水听器通常采用特殊的耐压结构或内外压力平衡设计,如释压或压力补偿结构、充油式、溢流式结构等。充油式和溢流式结构理论上可承受全海深的静态压力,是目前耐压水听器最常采用的耐压结构^[1-3]。这两种结构的耐压水听器一般都采用压电陶瓷圆管作为接收换能器,这种压电陶瓷圆管水听器具有结构工艺简单的优点,但也具有低频开路电压灵敏度低的缺点^[4]。文献[5]在径向极化压电圆管上开缝以提高接收灵敏度,但也使其工作频带大大变窄,只有10~200 Hz。如果使压电陶瓷圆管水听器的接收频段处于其谐振频率附近,虽然能够提高灵敏度,但其工作频带会严重受限,且灵敏度曲线平坦性会丧失。

除了压电圆管换能器外,压电球壳换能器也是声压水听器常用的接收换能器。压电球壳换能器具有结构工艺简单、灵敏度高、全向性好、工作频带宽等诸多优点,更重要的是材料和结构的特性决定了压电陶瓷球壳本身便具有较高的耐压能力,这在充油式或溢流式结构之外为耐压水听器设计提供了另一种可能,即采用空气背衬压电球壳作为耐压水听器的接收换能器。

1 压电球壳换能器的声学接收特性

1.1 低频接收灵敏度

受形状及加工工艺限制,压电陶瓷球壳通常只有径向极化一种极化方式,其正负电极分别在球壳的内外表面上。根据文献[6],对于内半径为 a 、外半径为 b 的压电球壳换能器,当受到频率远低于其本征频率的声压 p_0 的作用时,压电球壳内外电极间会产生电位差 V 。水听器的接收灵敏度一般用自由场接收灵敏度 M_e 来表示, M_e 定义为水听器输出端的开路电压与声场中在水听器位置的自由场声压的

比值,其分贝形式为自由场接收灵敏度。所以空气背衬压电球壳的低频开路接收电压灵敏度 M_e 为^[6]

$$M_e = \frac{V}{p_0} = \frac{1}{p_0} \int_a^b E_r dr = b \left[g_{33} \left(\frac{-2b^2 + ab + a^2}{2(b^2 + ab + a^2)} \right) + g_{31} \left(\frac{-(4b^2 + ab + a^2)}{2(b^2 + ab + a^2)} \right) \right], \quad (1)$$

其中, g_{33} 和 g_{31} 分别为压电陶瓷材料径向和切向的压电系数。由公式(1)可见,对于材料一定的空气背衬压电球壳,其灵敏度只与球壳的内半径 a 和外半径 b 有关。引入参数 $t = (b - a)/2b$,则式(1)可化为^[6]

$$M_e = b \left\{ g_{33} \left(\frac{t(2t - 3)}{3 - 6t + 4t^2} \right) + g_{31} \left(\frac{-(3 - 3t + 2t^2)}{3 - 6t + 4t^2} \right) \right\}. \quad (2)$$

易知 $t \in (0, 0.5)$ 是球壳厚度与外直径之比, t 越小球壳越薄。若代入本文所用压电材料的压电系数 $g_{33} = 25.6 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$ 、 $g_{31} = -9.6 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$,可得出 $|M_e/b|$ 与 t 的关系曲线如图1所示。

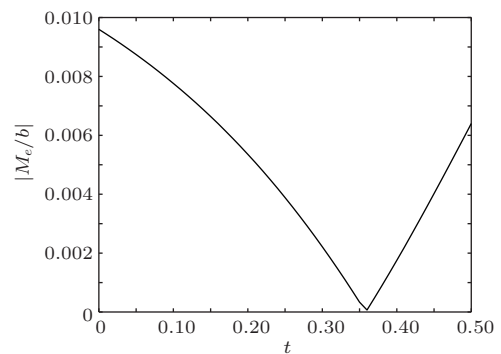


图1 $|M_e/b|$ 与 t 的关系

Fig. 1 Relationship between $|M_e/b|$ and t

由图1可知,在压电材料为本文所用材料的前提下,当 t 一定, b 越大,即压电球壳外径越大,灵敏度越高;当 b 一定, $t \approx 0.36$ 时,灵敏度最小,设计时应避开该点;当 b 一定, $t < 0.36$ 时, t 越小,即压电球壳厚度越薄,灵敏度越高。

1.2 谐振频率

根据文献[7],对于较薄的压电球壳换能器,其在空气中的谐振频率为

$$f_a = \frac{1}{2\pi\bar{r}} \sqrt{\frac{2Y_{11}^E}{\rho_s(1-\mu)}}. \quad (3)$$

由式(3)可知此时薄压电球壳的谐振频率仅与其平均半径 \bar{r} 以及材料的密度 ρ_s 、杨氏模量 Y_{11}^E 和泊松比 μ 有关,即相当于将其简化成了各向同性弹性材料的球壳。可见在压电材料确定的情况下,球壳的平均半径 \bar{r} 越大,其谐振点越高,其工作带宽越宽。

当在水中时,由于压电球壳换能器辐射阻抗增加,其谐振频率会略低于在空气中的谐振频率。压电球壳水听器作低频接收时,为保证其灵敏度的平坦性,其工作频率远离其谐振频率,工程上一般要求其谐振频率至少要大于其工作上限频率的5倍。

2 压电球壳换能器耐压性能分析

耐压结构的失效形式主要包括强度失效、刚度失效、稳定性失效和腐蚀失效^[8]。对大深度水听器而言,其承受的载荷主要为外部水压,其失效方式主要为强度失效和稳定性失效。下面分别讨论压电球壳换能器的这两种失效情况。

2.1 强度失效分析

强度失效是指容器中的最大应力超过屈服极限后出现不可恢复的形变或断裂而使容器失去承载能力的现象。与强度失效对应的是压电球壳换能器的最大许用压力。根据回转壳体的无力矩理论,在外压 p 的作用下,球壳会产生轴向拉应力 σ_z 和环向拉应力 σ_θ ,且二者在数值上相等,有^[8]

$$\sigma_z = \sigma_\theta = -\frac{pD_o}{4\delta}, \quad (4)$$

其中, D_o 为球壳外直径,单位为mm; δ 为球壳厚度,单位为mm。根据最大主应力理论,耐压结构设计要满足

$$\frac{pD_o}{4\delta} \leq [\sigma], \quad (5)$$

其中, $[\sigma]$ 为许用应力,根据我国国家标准GB 150.3,对材料标准常温屈服强度 R_{el} ,安全系数取 $n_s = 1.5$ 。压电球壳所用压电陶瓷材料P-51的常温屈服强度 $R_{el} = 137.9$ MPa,因此该材料的许用应力 $[\sigma] = R_{el}/n_s = 91.9$ MPa。将参数 t 代入,可得该压电球壳换能器的最大许用压力为

$$[p] \leq \frac{4\delta}{D_o} [\sigma] = 4t [\sigma]. \quad (6)$$

易知球壳厚度与外直径之比 t 越大,压电球壳的强度耐压能力越强。

2.2 稳定性失效分析

稳定性失效是指容器在外部载荷的作用下,由稳定的平衡状态变至另一个不稳定的状态,形状发生突然改变而丧失正常工作能力的现象。与稳定性失效对应的是压电球壳换能器的临界失稳许用压力。根据小变形理论,受外力作用的球壳的临界失稳压力 p_{cr} 为^[8]

$$p_{cr} = \frac{2Y_{11}^E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(\frac{\delta}{b}\right)^2. \quad (7)$$

此公式有较大误差,因此常用较大的安全系数予以弥补。根据GB 150.3,稳定安全系数取 $m = 14.25$,所以其周向失稳许用临界压力 $[p] = p_{cr}/m$ 。同样将参数 t 代入,可得该压电球壳换能器的周向失稳许用临界压力为

$$[p] = \frac{2Y_{11}^E}{m\sqrt{3(1-\mu^2)}} (2t)^2. \quad (8)$$

易知在压电材料确定的情况下,球壳厚度与外直径之比 t 越大,压电球壳的稳定性耐压能力越强。

3 有限元仿真

由上文分析知,对于压电球壳的灵敏度和工作频段来说,外径越大,厚度越薄越好;而对于其耐压能力来说,则是外径越小,厚度越厚越好。即声学性能和耐压性能两者是互相对立的关系。综合考虑声学性能和耐压性能的要求以及球壳加工难度和成本(通常外径越大,厚度越大,则加工难度越大,成本越高),设计球壳的外半径 $b = 15$ mm,厚度 $\delta = 3$ mm。球壳所用压电材料为P-51,其压电系数 $g_{33} = 25.6 \times 10^{-3}$ V·m/N, $g_{31} = -9.6 \times 10^{-3}$ V·m/N,密度 $\rho_s = 7600$ kg/m³,杨氏模量 $Y_{11}^E = 6.0 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\mu = 0.36$ 。

3.1 压电球壳声学特性仿真

为了验证压电球壳换能器声学接收特性分析的正确性,采用有限元分析的方法对其进行建模仿真,仿真使用的软件是COMSOL5.4。

3.1.1 接收灵敏度仿真

首先创建一个三维球壳结构模型。为了简化建模几何,加快解算速度,模型仅创建了1/8个压电球

壳, 并使用3个平面对称约束来实现完整球壳。在球面坐标中创建压电材料径向极化坐标系, 并使用压电材料P-51的材料参数。设定边界载荷为外表面受到0.1 MPa压力, 内表面不受压力。通过执行频域分析, 将其作为稳态问题进行求解。图2为受到频率为500 Hz、压强为0.1 MPa的压力时, 压电球壳电势分布的仿真结果。

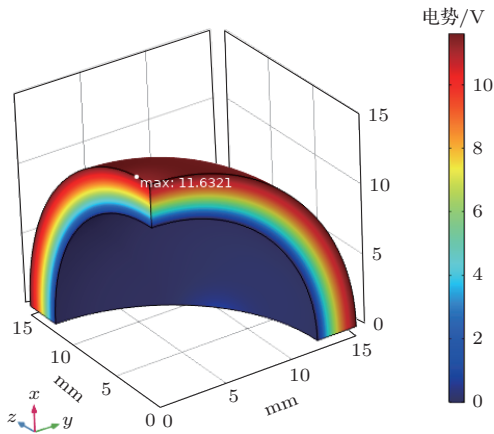


图2 压电球壳电势分布仿真结果

Fig. 2 Electric potential simulation result of the piezoelectric ceramic spherical shell

将压电球壳的尺寸和材料参数代入公式(1), 可得到其受到0.1 MPa的低频声压作用时的理论开路输出电压为11.646 V。由图2可见, 此压电球壳受到0.1 MPa@500 Hz的声压作用时, 其输出电压的仿真结果为11.632 V, 与理论值吻合。此时其灵敏度为-198.7 dB@500 Hz (0 dB = 1 V/ μ Pa)。

3.1.2 谐振频率仿真

下面同样采用有限元仿真方法对压电陶瓷球壳的谐振频率进行仿真, 仿真频段为1 Hz~200 kHz。首先将压电球壳的材料简化成各向同性弹性材料, 对其进行扫频分析, 得到其形变的频率响应曲线如图3所示。根据公式(3)推导压电球壳在空气中的谐振频率 f_a 为58.557 kHz, 由图3可见其谐振频率仿真值为58.9 kHz, 与理论值基本吻合。需要注意的是公式(3)只是针对各向同性薄球壳的简化计算, 而压电球壳材料并非各向同性, 且厚度较厚, 直接套用公式(3)会有一定的误差。若将压电陶瓷的完整参数代入, 仿真得其开路电压灵敏度的频率响应曲线如图4所示。由图4可见在1 Hz~10 kHz 频段, 压电球壳的灵敏度曲线非常平坦, 灵敏度为-198.7 dB, 与理论分析一致。而其谐

振频率变为72.1 kHz, 较公式(3)的计算结果稍微增大, 但并不影响该公式在工程应用上的有效性。由于无法获取该压电材料的相关阻尼系数, 因此将模型中的柔度矩阵损耗因子和压电矩阵损耗因子设置为0, 这导致仿真出该压电球壳在谐振频率处的灵敏度为-155 dB, 实际上灵敏度应该小于该值。

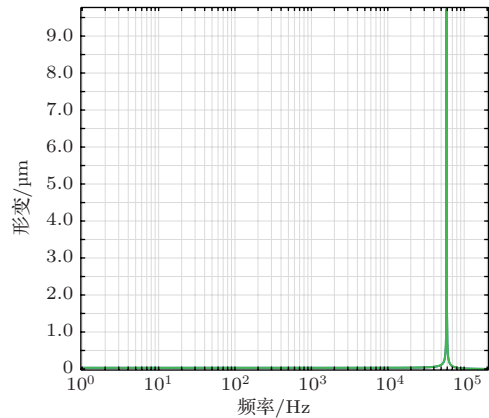


图3 各向同性球壳的形变-频率响应曲线仿真结果

Fig. 3 Deformation-frequency response simulation result of the isotropic spherical shell

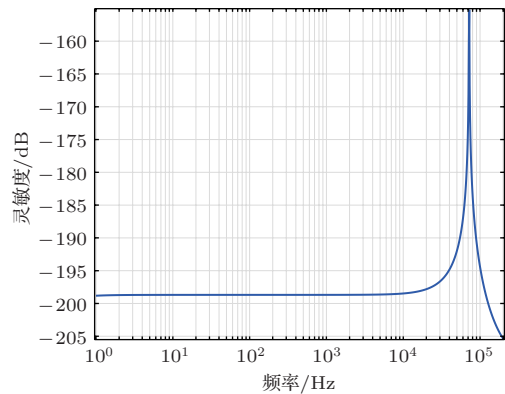


图4 压电球壳的开路电压灵敏度-频率响应曲线仿真结果

Fig. 4 Sensitivity-frequency response simulation result of the piezoelectric spherical shell

3.2 压电球壳耐压性能仿真

第2节中的耐压性能理论计算公式是为了方便工程应用而总结的简化式, 并且实际的压电球壳因安装需要会进行开孔, 这都可能会导致实际耐压能力与理论计算结果不符。为尽量准确地得到压电球壳换能器的耐压能力, 通过有限元分析软件Workbench分别对其进行结构静力仿真和特征值屈曲仿真。

3.2.1 结构静力仿真

结构静力仿真可以得出结构承受载荷时结构各处的应力分布,因此已知材料的最大许用应力即可仿真出其能承受的最大许用压力。建立球壳的三维模型,并在球壳模型上设置安装孔。将球壳采用六面体法划分网格,在安装孔内圆柱面和下平面设置辊支撑,在压电球壳换能器的外表面施加压力并不断改变压力的大小,对其进行结构静力分析。仿真发现,当外表面施加的压力达到28 MPa时,压电球壳最大应力为151 MPa,其应力分布如图5所示(为了方便观察内部应力将压电球壳沿中线剖开显示)。需要注意的是最大应力只发生在安装孔上圆角的边界线处,剩余其他地方的最大应力均小于该压电材料的安全许用应力91.9 MPa,所以根据仿真压电球壳的最大许用压力可以达到28 MPa。而根据公式(6)可求得该压电球壳换能器的最大许用压力为36.8 MPa,可见球壳打孔后的耐压强度低于完整球壳的理论强度。仿真中安装孔处极少地方出现的应力集中现象,超出了安全许用应力,对压电球壳的耐压是否有影响还有待耐压试验验证。

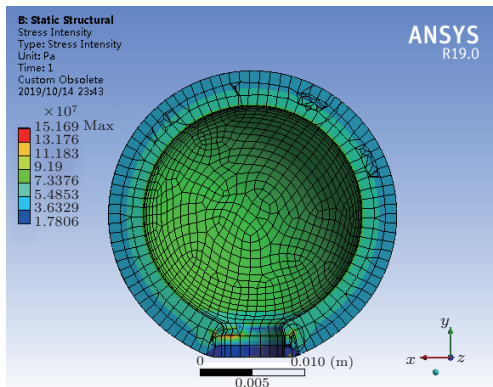


图5 压电球壳结构静力仿真结果

Fig. 5 Static structural simulation result of the piezoelectric spherical shell

3.2.2 特征值屈曲仿真

特征值屈曲仿真可以得到薄壳结构的各阶屈曲模态以及其对应的临界失稳压力。在压电球壳换能器外表面施加1 MPa的压力,对其进行特征值屈曲分析。仿真结果显示,其第一阶屈曲模态如图6所示,第一阶波数 $n = 4$,符合球壳失稳特征。第一阶屈曲载荷因子为3379,故其第一阶临界载荷为3379 MPa。由于第一阶为屈曲载荷的最低值,这意味着在理论上压力达到3379 MPa时,该压电球壳

结构才会发生失稳。而根据公式(7)可求得该压电球壳换能器的周向失稳临界压力为2970 MPa,与仿真结果基本符合。

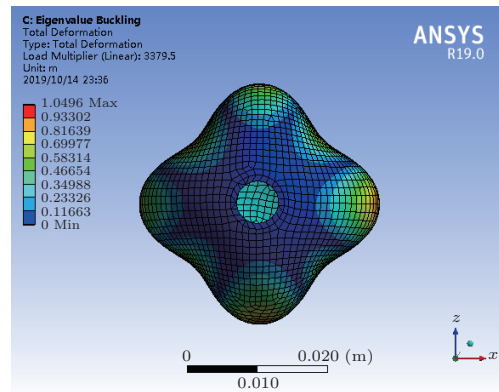


图6 压电球壳特征值屈曲仿真结果

Fig. 6 Eigenvalue buckling simulation result of the piezoelectric spherical shell

有限元仿真结果表明,该压电球壳换能器的其最大许用压力为28 MPa,而其临界失稳压力为3379 MPa,这表明当外部压力持续增大时,该压电球壳换能器最先发生的是强度失效,也说明其安全耐压深度为2800 m。

4 球形耐压水听器研制及性能测试

4.1 球形耐压水听器研制

本文采用径向极化空气背衬压电球壳换能器作为声学接收敏感元件,设计并制作了一种球形耐压水听器。该球形耐压水听器所用的压电球壳外

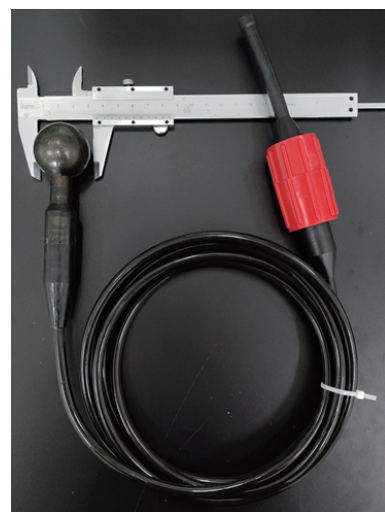


图7 球形耐压水听器样品

Fig. 7 The spherical pressure-resistant hydrophone

半径为15 mm,球壳厚度为3 mm,球壳所用压电陶瓷材料为P-51。压电球壳的内部是空腔,最外面灌封了一层透声橡胶,起到绝缘、密封和保护的作用,透声橡胶的厚度为3 mm。球形耐压水听器的实物如图7所示,整个水听器的直径为36 mm。

4.2 球形耐压水听器性能测试

4.2.1 接收灵敏度测试

将制作完成的球形耐压水听器置于驻波管中,采用比较法测试其低频开路接收灵敏度。将球形耐压水听器和标准水听器同时悬挂于驻波管中同一高度上,改变驻波管声源发射频率,同时记录二者的输出电压,通过比较法得到球形耐压水听器的接收灵敏度。所用驻波管只能产生50~1000 Hz的合格驻波,因此本次的测量频段为50~1000 Hz。球形耐压水听器的灵敏度曲线实测结果如图8所示。由测试结果可见该球形耐压水听器在50~1000 Hz频段的灵敏度约为-198.4 dB,与理论值基本吻合。在50~1000 Hz范围内,灵敏度起伏不超过±0.5 dB。

驻波管中只能完成1 kHz以下的标定,对于1 kHz~10 kHz频段,在消声水池内进行了测量。将制作完成的球形耐压水听器和标准水听器置于

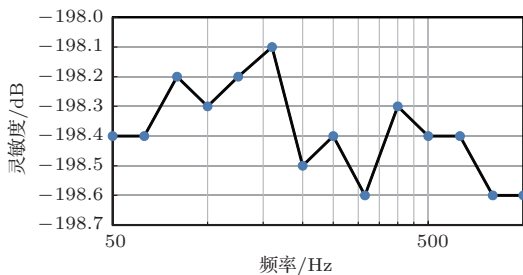


图8 球形耐压水听器灵敏度实测结果(50~1000 Hz)
Fig. 8 Sensitivity measurement result of the spherical pressure-resistant hydrophone at 50~1000 Hz

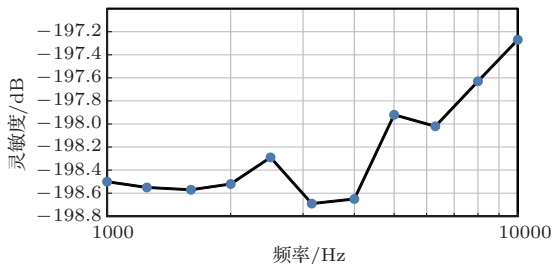


图9 球形耐压水听器灵敏度实测结果(1 kHz~10 kHz)
Fig. 9 Sensitivity measurement result of the spherical pressure-resistant hydrophone at 1 kHz~10 kHz

消声水池同一位置,使用声源播放不同频率的单频信号,同样采用比较法来完成接收灵敏度测量。球形耐压水听器在1 kHz~10 kHz的灵敏度曲线实测结果如图9所示。由测试结果可见该球形耐压水听器在1 kHz~10 kHz频段的灵敏度约为-198 dB,与理论值基本吻合。在1 kHz~10 kHz范围内,灵敏度起伏不超过±1.4 dB。

4.2.2 自噪声测试

为确保水听器能够拾取微弱声信号,需要水听器具有较低的等效自噪声。将球形耐压水听器置于电磁屏蔽、阻尼减振的真空罐内,使用噪声极低的BK-3050信号采集卡对其进行自噪声测试。球形耐压水听器的等效自噪声频谱如图10中红色实线所示。图10中黑色虚线为最早研究海洋噪声的Kundson所总结的0级海况海洋背景噪声谱级线^[9]。根据Kundson曲线,0级海况下海洋背景噪声谱级约为44 dB@1 kHz,需要注意的是此数据为1948年的研究结果。近年来,随着全球航运业务快速发展,海洋背景噪声正在逐年增大。图10中蓝色点划线为2013年南中国海0级海况背景噪声谱级线^[10],可见该球形耐压水听器的等效自噪声谱级在10~1500 Hz区间内均低于或等于0级海况海洋背景噪声,在1500~5000 Hz区间内略微高于0级海况海洋背景噪声。其在1000 Hz处的等效自噪声谱级为46.5 dB。

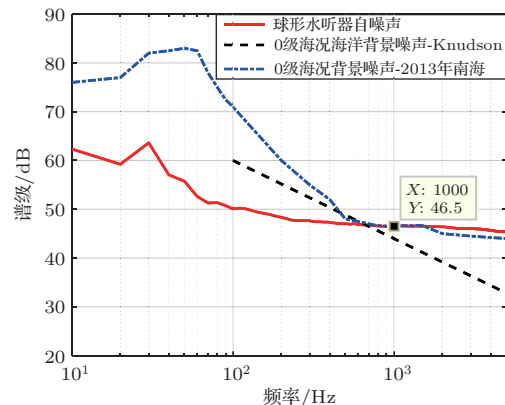


图10 球形耐压水听器自噪声谱级实测结果
Fig. 10 Noise Spectral measurement result of the spherical pressure-resistant hydrophone

4.2.3 耐压性能测试

为验证该球形耐压水听器的耐压能力,将球形耐压水听器试样放入压力釜内进行打压测试。为确保安全,测试系统采用高压水加压。前文分析其

安全耐压能力为28 MPa,这是在1.5倍安全系数下得到的结果,也就是说其理论上的极限耐压能力为42 MPa。为了兼顾安全性与易用性,这里取整到30 MPa进行测试。测试时先加压到30 MPa,保压3 h,泄压,检查水听器;随后再次加压到30 MPa,如此重复测试3次。整个加压过程没有发生明显压降。每次加压结束后检查被测水听器,外观无损伤,测试前后称重一致,然后在驻波管中对其灵敏度重新进行测试,测试结果显示与打压前的灵敏度基本一致。这证明其能够耐受3000 m水压。

5 结论

本文采用理论公式与有限元仿真相结合的方法,利用压电球壳结构和材料所具有的耐压能力,使用径向极化空气背衬压电球壳换能器作为声学接收敏感元件,设计并制作了一种球形耐压水听器。该球形耐压水听器的直径为36 mm,工作频段为50 Hz~10 kHz,低频灵敏度为-198.4 dB,等效自噪声谱级为46.5 dB@1 kHz,工作深度为3000 m。本文所用的空气背衬压电球壳方案在灵敏度较高的情况下获得了一定的耐压能力,若要继续提高其耐压深度,就要以损失其灵敏度作为代价。这种方案所能达到的耐压能力较为有限,若水听器需要获取更大的耐压深度(如全海深),则选择充油式或溢流式方案会更优。

参 考 文 献

- [1] 李俊宝,夏金东,高俊琴,等.一种深海宽带半球指向性换能器[C].2008年全国声学学术会议论文集,2008:556-557.
- [2] 张鸿磊.深海圆管水听器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [3] Ardid M, Martínez-Mora J A, Bou-Cabo M, et al. Acoustic transmitters for underwater neutrino telescopes[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4113-4132.
- [4] Liu J W. The design of a kind of free-flooded ring transducer used in underwater communication[C]. China, 2016 IEEE/OES. *China Ocean Acoustics*, 2016: 131-134.
- [5] 卢苇,蓝宇,石桂欣.开缝压电圆环深海海水听器[J].*声学学报*, 2017, 42(6): 721-728.
Lu Wei, Lan Yu, Shi Guixin. Slot piezoelectric ring deep ocean hydrophone[J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(6): 721-728.
- [6] 周福洪.水声换能器及基阵[M].北京:国防工业出版社,1984:130.
- [7] 王矜奉,苏文斌,王春明,等.压电振动理论与应用[M].北京:科学出版社,2011:133.
- [8] 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.
- [9] Knudson V O, Alford R S, Emling J W. Underwater ambient noise[J]. *Journal of Marine Research*, 1948, 7(3): 410-429.
- [10] 笮良龙,王超,卢晓亭,等.基于潜标测量的海洋环境噪声谱特性分析[J].*海洋学报*, 2014, 36(5): 54-60.
Da Lianglong, Wang Chao, Lu Xiaoting, et al. The characteristic analysis of ambient sea noise spectrum based on submersible buoy[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(5): 54-60.