

压电三迭片式高阶声压梯度水听器研究

周宏坤^{1,2}, 魏柠阳^{1,2}, 李晓伟^{1,2}, 张崇丙^{1,2}

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 该文从数学上计算了不同阶声压梯度组合对空间声场的估计误差, 分析了差分通道幅度和相位不一致性对有限差分近似误差的影响, 研究了水听器自噪声及模数转换量化误差对高阶水听器工作频率下限的制约关系, 提出了一种由4片压电三迭片构成的高阶声压梯度水听器, 尺寸为 $\varnothing 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 能够测量声场一阶声压梯度和二阶混合声压梯度。利用有限元法计算获得平面波自由声场中水听器各通道的输出电压。计算结果表明, 二阶混合声压梯度通道的输出电压响应每倍频程升高12 dB, 指向性与纵向四极子声源指向性一致。

关键词: 压电三迭片; 高阶声压梯度; 有限差分近似; 工作频带; 四极子指向性

中图分类号: TB565.1; TN304.9 **文献标志码:** A

Research on High-order Acoustic Pressure Gradient Hydrophone Using Piezoelectric Bimorphs

ZHOU Hongkun^{1,2}, WEI Ningyang^{1,2}, LI Xiaowei^{1,2}, ZHANG Chongbing^{1,2}

(1. China Ship Science Research Center, Wuxi 214082, China;

2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China)

Abstract: The estimation errors on the spatial acoustic field using different order acoustic pressure gradient combinations were analyzed mathematically, and the effect of the inconsistency between the amplitude and phase in the differential channel on the finite difference approximation errors was calculated. The constraints of the self-noise of the hydrophone and the quantization error of analog-to-digital conversion on the lower limit of the operating frequency of the high-order hydrophone were studied. A high-order acoustic pressure gradient hydrophone composed of four piezoelectric bimorphs was proposed. The size of the hydrophone is $\varnothing 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, capable of measuring the first-order acoustic pressure gradient and the second-order mixed acoustic pressure gradient in the sound field. The output voltage of each channel of the hydrophone in the plane wave sound field were obtained by finite element simulation. The calculated results show that the output voltage response of the second-order mixed pressure gradient channel increases by 12 dB per octave, and the directivity is consistent with that of the longitudinal quadrupole acoustic source.

Key words: piezoelectric bimorph; high-order acoustic pressure gradient; finite difference approximation; operating frequency band; quadrupole directivity

0 引言

近年来,随着对低频、超指向性声学探测与测量研究的不断深入,小体积的高阶声压梯度水听器成为研究热点^[1]。声压梯度具有与频率无关的方向性特点,如一阶声压梯度为偶极子声源的指向性,二阶声压梯度则具有四极子声源的指向性,因此,利用高阶梯度量能有效改善低频水声接收系统的方向性,从而提高测向精度^[2]。目前,在空气声及水声领域

均开展了声场高阶梯度量的研究和应用,高阶量的测量装置包括扬声器阵列、声压水听器阵列、矢量水听器阵列及高阶水听器等^[3-7]。

国内外研究表明,测量声场一阶声压梯度有3种方法。第一,通过直接测量空间邻近两处位置的声压值,在结构上或模拟电路,或数字信号处理中做差分运算^[8];第二,设计一种敏感结构,使其在声压梯度力作用下发生变形,从而产生与梯度力成比例

收稿日期:2022-04-30

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20180171);海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019002)

作者简介:周宏坤(1987-),男,江苏省盐城市人,高级工程师,博士,主要从事水声传感器与测量技术的研究。

的电或光信号^[9];第三,根据小振幅声场中声学运动方程 $\nabla p = -\rho_0 \partial u / \partial t$,通过测量声压梯度力驱动的刚体运动(速度、加速度等),获得声压梯度信息,即同振(惯性)式矢量水听器^[10]。对于声场更高阶的声压梯度量,目前的有效方式是对声压(或质点振速)进行多次差分,但随着差分误差的累积,梯度量的准确性无法得到保证。

本文分析了有限差分距离、通道一致性、水听器自噪声及模数转换量化误差对高阶声压梯度测量精度的影响,在分析声压梯度测量误差的基础上,提出了一种利用压电三选片组成的高阶声压梯度水听器结构。有限元仿真表明,该水听器能实现对声场一阶声压梯度和二阶混合声压梯度的测量。

1 理论基础

用声压描述声场,将声压 $p(\mathbf{r})$ 在 \mathbf{r}_0 处做泰勒幂级数展开,省略时间因子 $e^{j\omega t}$,有:

$$\begin{cases} p(\mathbf{r}) = p(\mathbf{r}_0) + (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} + \frac{1}{2} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \\ \quad \frac{\partial^2 p}{\partial \mathbf{r}^2} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)^T + R_3 \\ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 p}{\partial \mathbf{r}^2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} & \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} & \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} & \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial z} & \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_3 为声压梯度高阶小量。空间声场分布 $p(\mathbf{r})$ 可通过测量某一点的声压 $p(\mathbf{r}_0)$ 、高阶声压 $p^{(n)}(\mathbf{r}_0)$ 及空间位置 $(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ 获得。

不失一般性,在 x 方向令

$$\begin{cases} \hat{p}_0(x) = p(x_0) \\ \hat{p}_1(x) = p(x_0) + \frac{\partial p}{\partial x}(x - x_0) \\ \hat{p}_2(x) = p(x_0) + \frac{\partial p}{\partial x}(x - x_0) + \\ \quad \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x - x_0)^2 \\ \vdots \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\hat{p}(x)$ 为声场 $p(x)$ 的估计量。考虑到由不同阶声压梯度相加构成的 $\hat{p}(x)$,计算得到其与真实值 $p(x)$ 之间的误差,用均方值误差表示为

$$MSE = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi |p(x) - \hat{p}(x)|^2 d\beta \quad (3)$$

式中 β 是波矢量与位矢量的夹角。

根据式(3)计算不同阶声压梯度组合对应的声场估计误差,结果如图1所示。对于声压水听器、矢量水听器及高阶量组合声接收器,声场估计均方值误差和空间距离(x)及波长(λ)有关。当均方值误差为10%时,声压水听器测量(声学孔径 $D=2x$)约为 $\lambda/10$,矢量水听器约为 $\lambda/3$,则前3阶声压梯度组合声接收器约 $\lambda/2$ 。因此,通过测量高阶声压梯度量能获得更多的声场信息,而受限于现有声学测量手段,目前测量声场二阶及以上声压梯度量较难^[2]。

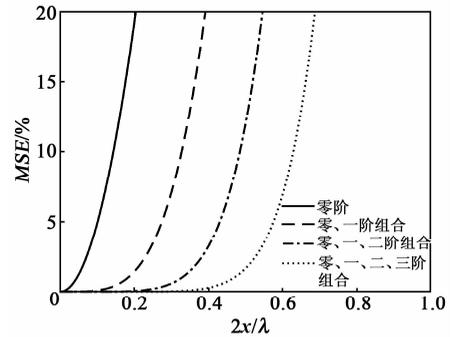


图1 不同阶声压梯度组合对应的声场估计误差

2 有限差分近似

当差分距离(Δr)相比声波波长足够小时,声压梯度值可用有限差分近似的方法进行估算,差分距离与声波波长的比值($\Delta r/\lambda$)决定了近似误差。对于任意平面波有:

$$p(t, \mathbf{r}) = f\left(t + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}}{c}\right) \quad (4)$$

式中 \mathbf{n} 为波数 \mathbf{k} 的单位矢量; c 为介质中的声速。一阶声压梯度对应的傅里叶变换为

$$\frac{\partial^{2n} P(\omega, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}^{2n}} = (j\mathbf{k})^{2n} \cdot F(\omega) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (5)$$

声场中水听器输出电压信号为 $V(\omega, \mathbf{r})$,它等于灵敏度函数 $K(\omega)$ 与声压 $P(\omega, \mathbf{r})$ 的乘积:

$$V(\omega, \mathbf{r}) = K(\omega) P(\omega, \mathbf{r}) \quad (6)$$

相应地,声场中两只水听器的输出信号之差为

$$\Delta V(\omega, \mathbf{r}) = K_2(\omega) P_2(\omega, \mathbf{r}) - K_1(\omega) P_1(\omega, \mathbf{r}) \quad (7)$$

定义水听器的失配函数:

$$M(\omega) = \frac{K_1(\omega)}{K_2(\omega)} = \mu(\omega) e^{j\zeta(\omega)} \quad (8)$$

式中 $\mu(\omega)$ 为幅度失配函数; $\zeta(\omega)$ 为相位失配函数。

结合式(7)、(8),在 x 方向有:

$$\left| \frac{\Delta P(\omega, x)}{\Delta x} \right| = |F(\omega)| \left| \frac{\mu(\omega) e^{j[\zeta(\omega) - k_x \frac{\Delta x}{2}]} - e^{jk_x \frac{\Delta x}{2}}}{\Delta x} \right| \quad (9)$$

结合式(5)、(9),定义有限差分近似误差为

$$\varepsilon_1 = 20 \lg \left| \frac{\frac{\Delta P(\omega, x)}{\Delta x}}{\frac{\partial P(\omega, x)}{\partial x}} \right| \quad (10)$$

当不存在幅度和相位失配($\mu=1, \zeta=0$)时,式(10)转化为

$$\varepsilon_1 = 20 \lg \left| \frac{\sin(\pi \cos \theta \cdot \frac{\Delta x}{\lambda})}{\pi \cos \theta \frac{\Delta x}{\lambda}} \right| \quad (11)$$

式(11)表明,有限差分误差随着 $\Delta x/\lambda$ 值的变大而迅速增大,随着入射角度偏离 x 轴,误差逐渐降低,当 $\Delta x/\lambda=1/4$ 时,轴向入射的有限差分误差约为 -1 dB,因此,有限差分距离需根据工作频带上限和最大允许误差确定。

当仅存在幅度失配($\zeta=0$),式(10)转化为

$$\varepsilon_1 = 20 \lg \left| \frac{\sqrt{\mu^2 - 2\mu \cos[2\pi(n_x \Delta x/\lambda)] + 1}}{2\pi(n_x \Delta x/\lambda)} \right| \quad (12)$$

当仅存在相位失配($\mu=1$),式(10)为

$$\varepsilon_1 = 20 \lg \left| \frac{\sqrt{2 - 2\cos(2\pi n_x \Delta x/\lambda - \zeta)}}{2\pi n_x \Delta x/\lambda} \right| \quad (13)$$

式(12)、(13)表明,差分通道幅度不一致对高阶水听器轴向灵敏度的影响较大,而相位不一致产生的影响更复杂。差分距离较小时,高阶声压梯度的测量误差对相位差异更敏感^[3]。

在2只差分水听器中心点再放置1个水听器,即可实现二阶纯声压梯度的测量。类似有5元水听器可实现四阶纯声压梯度的测量, $2n+1$ 元水听器可实现 $2n$ 阶纯声压梯度的测量。

$$\left[\frac{\Delta P(\omega, x)}{\Delta x} \right]^{(2n)} = F(\omega) \frac{\sum_{i=0}^{2n} C_{2n}^i (-1)^i}{\left(\frac{\Delta x}{2n} \right)^{2n}} \times \exp \left[jk \Delta x \left(i \frac{1}{2n} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (14)$$

结合式(5)、(14),计算可得到 $2n$ 阶有限差分近似误差。图2为一、二、四、六阶有限差分的近似误差(x 轴方向)。由图可以看出,随着水听器数量的

增加,单次差分距离逐渐减小,高阶差分对应的误差也逐渐降低。

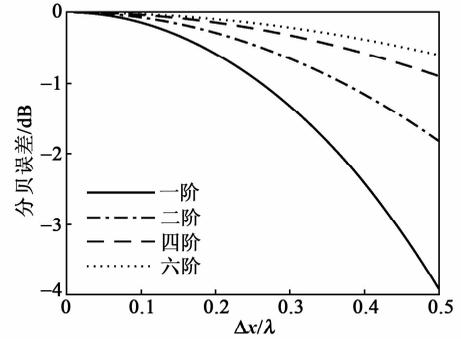


图2 不同阶声压梯度有限差分近似误差

3 水听器性能分析

采用差分结构设计了高阶声压梯度水听器。差分距离上限根据工作频率、差分误差确定,差分距离下限则由水听器自噪声和采集电路量化误差决定。

3.1 自噪声及量化误差限制

声压水听器的等效噪声声压等效于最小可检测声压能力,声场中无限接近的两个位置的声压差值如果小于噪声声压值,则有限差分为0。因此,只有当水听器两个通道的差值大于水听器自噪声,测量结果才有意义。根据式(9),声场空间两点的声压差为

$$\Delta P(\omega, \mathbf{r}) = -2j \sin \left(\mathbf{k} \cdot \frac{\Delta \mathbf{r}}{2} \right) \cdot P(\omega, \mathbf{r}) \quad (15)$$

声压水听器直接输出模拟信号,在模拟/数字转换量化(ADC)过程中,量化误差不可能无限小,这会限制水听器的检测能力。量化误差(NL_{adc})与水听器自噪声类似,用水听器的检测阈(DT) (0 dB参考值 $1 \mu\text{Pa}$)表示为

$$DT = SPL + 20 \lg \left| -2j \sin \left(\mathbf{k} \cdot \frac{\Delta \mathbf{r}}{2} \right) \right| - ENL(NL_{adc}) \quad (16)$$

式(16)中,令声压级 $SPL=90$ dB, $ENL=40$ dB(0 dB参考值 $1 \mu\text{Pa}$,设其不随频率变化)。假设模拟/数字转换输入范围为 ± 5 V,水听器两个通道的灵敏度均为 -160 dB(包括前置放大增益),得到 $\Delta x/\lambda$ 与自噪声及量化误差的关系曲线如图3所示。由图可知,24位ADC对应的量化误差等效噪声级为35 dB,考虑到水听器自噪声及检测阈的要求(设为6 dB),则 $\Delta x/\lambda \geq 0.03$ 。如果要求有限差分误差小于 -1 dB,则 $\Delta x/\lambda \leq 0.26$,即对于10 cm的声压

梯度水听器,其工作频带为 450~3 900 Hz。

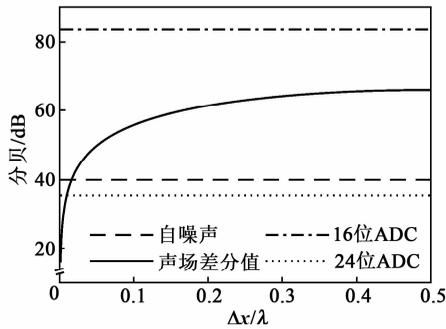


图3 模数转换量化误差与 $\Delta x/\lambda$ 、自噪声的关系

3.2 水听器性能仿真分析

压电三选片受外力作用时,整体发生弯曲变形,背衬两侧压电元件的应变相反。因此,设计时可通过配置压电元件极化方向、空间位置及并联接线方式,实现对声场一阶声压梯度和二阶混合声压梯度的测量。4只压电三选片结构如图4所示,一阶及二阶混合声压梯度可表示为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_1 - p_3}{2r} \quad (17)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_2 - p_4}{2r} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 p}{\partial y \partial x} = \frac{p_1 - p_2 + p_3 - p_4}{2r^2} \quad (19)$$

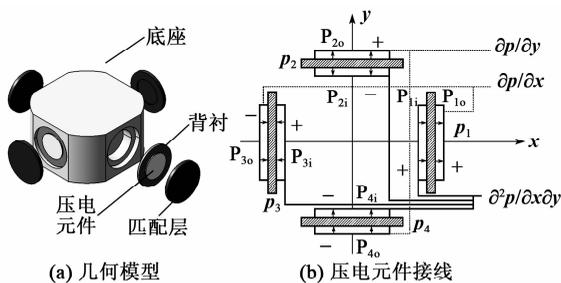


图4 高阶声压梯度水听器几何模型与压电元件接线图

如图4(a)所示,利用有限元法对水下自由场中高阶声压梯度水听器的输出响应进行计算分析,声场幅值设为 1 Pa。水听器几何模型各部件参数如表1所示。

表1 高阶声压梯度水听器几何模型参数

部件	尺寸	材料
底座/mm	$\varnothing 100 \times 50$	316L
背衬/mm	$\varnothing 40 \times 2$	黄铜
压电元件/mm	$\varnothing 25 \times 1$	PZT5H
匹配层/mm	$\varnothing 40 \times 3$	硅橡胶

在仿真计算中,令水听器 x 轴方向与声传播方向一致,计算得到 8 片压电陶瓷片($P_{1i} \sim P_{4o}$)的输出电压响应如图5所示(0 dB 参考值 1 V)。由图可见,压电三选片外侧压电元件的输出电压响应比内侧高,这是由于声压直接作用到外侧压电元件上,附加了厚度方向振动。随着频率逐渐升高(超过 5 kHz),近场散射效应明显增强,声传播方向上前对称放置的三选片的电压输出响应差异逐渐增大。此外,该水听器的谐振频率为 15 kHz。

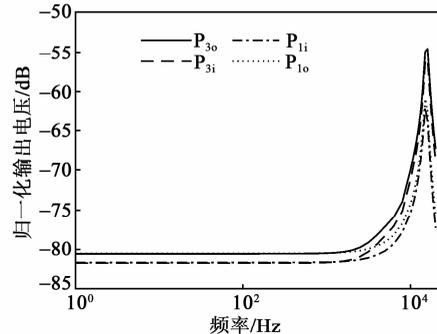
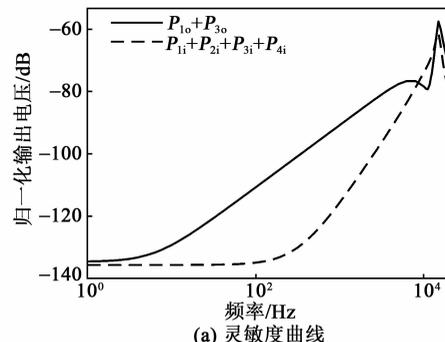


图5 单片压电元件输出响应曲线

根据式(17)~(19)对压电元件进行组合,计算组合后的输出电压响应,如图6(a)所示。由图可见,组合通道($P_{1o} + P_{3o}$)对应一阶声压梯度通道,输出电压响应在频率 20 Hz~5 kHz 内满足每倍频程 6 dB 增加的规律;组合通道($P_{1i} + P_{2i} + P_{3i} + P_{4i}$)对应二阶混合声压梯度,输出电压响应在频率 500 Hz~10 kHz 内满足每倍频程 12 dB 增加的规律。当频率小于 10 Hz 时,用于差分的两只压电三选片所在位置的声场声压值几乎相同,无法实现一阶声压梯度测量,此时输出电压响应由两个通道的一致性决定。同理,当频率小于 200 Hz 时,无法实现二阶混合声压梯度测量。当频率超过 5 kHz,近场散射影响不能忽略。需要注意的是,有限元仿真未考虑水听器的自噪声。



(a) 灵敏度曲线

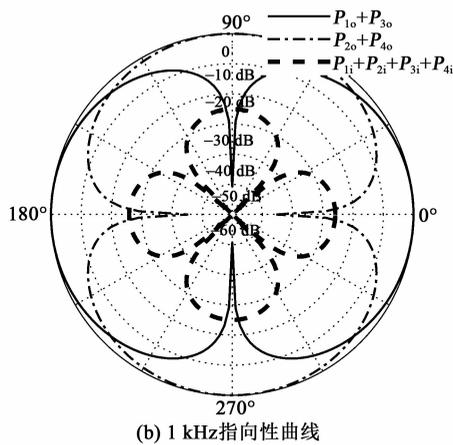


图6 一、二阶声压梯度输出响应曲线

一阶、二阶混合声压梯度通道输出响应 1 kHz 指向性曲线如图 6(b) 所示(0 dB 参考值 1 V)。一阶声压梯度通道输出响应指向性与偶极子声源指向性一致,二阶混合声压梯度通道输出响应的指向性与纵向四极子声源指向性一致。

4 结束语

声场泰勒幂级数展开表明,组合利用高阶声压梯度水听器具有更大的声学孔径,由此可获得更多的声场信息。高阶声压梯度水听器工作频率上限主要由有限差分近似误差和差分距离决定。差分通道幅度、相位不一致性会对高阶水听器轴向灵敏度产生较大且复杂的影响。高阶声压梯度水听器工作频率下限取决于水听器自噪声及模数转换电路量化误差。本文提出了一种基于压电三选片的高阶声压梯度水听器,包括 4 只压电三选片和 1 个安装基座。仿真结果表明,该高阶水听器在结构上通过配置压电元件的极化方向、空间位置和接线方式,实现了对声场一阶声压梯度和二阶混合声压梯度的测量。研究成果可为高阶声压梯度水听器的设计及工程使用提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] MCCONNELL J A, RORICK T P. Review of directional sensors for low frequency underwater acoustic applications[C]//BC, Canada; 176th Meeting of the Acoustical Society of America and the 2018 Acoustics Week in Victoria, 2018.
- [2] 李玥. 二阶多模矢量水听器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

- [3] 杨德森, 孙心毅, 洪连进, 等. 基于矢量水听器的振速梯度水听器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(1): 7-14.
- YANG Desen, SUN Xinyi, HONG Lianjin, et al. The velocity gradient sensor based on the vector hydrophone[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(1): 7-14.
- [4] GUR B. Particle velocity gradient based acoustic mode beamforming for short linear vector sensor arrays[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(6): 3463-3473.
- [5] 杨士莪. 小型矢量阵深海被动定位方法[J]. 应用声学, 2018, 37(5): 588-592.
- YANG Shi'e. Method of passive localization in deep sea by small vector sensor array[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(5): 588-592.
- [6] 汪勇, 杨益新, 马远良. 圆环形声学传感器阵列超指向性理论及方法[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 297-309.
- WANG Yong, YANG Yixin, MA Yuanliang. Discussion about the superdirective beamforming theory and methods of circular acoustic sensor arrays[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(4): 297-309.
- [7] 朱少豪, 汪勇, 杨益新. 质点振速传感器直线阵超指向性波束形成[J]. 应用声学, 2019, 38(4): 596-604.
- ZHU Shaohao, WANG Yong, YANG Yixin. Superdirective beamforming of line arrays using particle velocity sensors[J]. Applied Acoustics, 2019, 38(4): 596-604.
- [8] KORENBAUM V I, TAGILTSEV A A, GOROVOI S V, et al. A low-frequency power-type pressure-gradient receiver for oceanological investigations [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2017, 60: 728-732.
- [9] CRANCH G A, MILLER G A, KIRKENDALL C K. Fiber-optic, cantilever-type acoustic motion velocity hydrophone[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(1): 103-114.
- [10] ZHOU Hongkun, HONG Lianjin, SUN Xinyi, et al. An inertial-type acoustic vector sensor used in airborne sonobuoy [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2021, 64(1): 153-156.