

## 低噪声矢量传感器研究

李智<sup>1,2,3,4</sup>, 陈洪娟<sup>1,2,3</sup>, 张海刚<sup>1,2,3</sup>, 郭俊媛<sup>1,2,3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 工业和信息化部, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工程大学 三亚南海创新发展基地, 海南 三亚 572024)

**摘要:**低频自噪声过高严重制约了矢量传感器在目标探测领域优势的发挥。为解决这一问题,本文建立了包含压电加速度计和前置放大电路的最小系统噪声分析模型,分析了加速度计及其匹配电路的噪声贡献机制,探讨了压电材料特性、声压灵敏度和电容量等参数对噪声性能的影响规律,据此提出了矢量传感器系统的低噪声设计原则,并研制了基于弛豫铁电单晶的低噪声矢量传感器样机。测试结果表明:样机在 100 Hz 频点的等效噪声声压级为 40.7 dB,较传统压电陶瓷样机降低 11.7 dB,与预测值一致;自噪声在 20 Hz 以上频段全面低于 Knudsen SS0,在 100 Hz 以上进一步低于 Wenz's SS0,验证了低噪声设计方法的有效性。研究成果为矢量传感器在低频率弱信号探测领域的工程应用提供了有力的理论依据和技术支撑。

**关键词:**矢量传感器;矢量水听器;自噪声;弛豫铁电单晶;水声换能器;低噪声;水声传感器;压电传感器

**DOI:** 10.11990/jheu.202506048

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250702.1025.002>

**中图分类号:** TH73 TB565.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1650-10

## Study on low-noise acoustic vector sensors

LI Zhi<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Hongjuan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Haigang<sup>1,2,3</sup>, GUO Junyuan<sup>1,2,3</sup>

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 4. Sanya Nanhai Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Sanya 572024, China)

**Abstract:** Excessive low-frequency self-noise remains the primary bottleneck limiting vector sensor performance in target detection applications. To address this issue, a minimum system noise analysis model incorporating a piezoelectric accelerometer and a preamplifier circuit was established, and the noise contribution mechanisms of both the accelerometer and the coupling circuit were analyzed. The effects of piezoelectric material properties, acoustic pressure sensitivity, and capacitance on noise performance were further investigated. Based on these findings, design principles for low-noise vector sensor systems were proposed, and a prototype based on a relaxor ferroelectric single crystal was developed. Test results indicated that the equivalent noise pressure level at 100 Hz reached 40.7 dB, representing an 11.7 dB reduction compared with a conventional piezoelectric ceramic prototype, and showed good agreement with predicted values. The self-noise remained below Knudsen SS0 across the frequency band above 20 Hz and further below Wenz's SS0 above 100 Hz, confirming the effectiveness of the proposed low-noise design method. These results provide both theoretical and technical support for the engineering application of vector sensors in low-frequency weak signal detection.

**Keywords:** vector sensors; vector hydrophone; relaxor ferroelectric single crystal; self-noise; underwater acoustic transducer; low-noise; underwater acoustic sensors; piezoelectric sensors

水声矢量传感器技术在我国已发展近 30 年,其

理论优势正逐步转化为实际性能提升,拓展了水声工程的研究方向,并在水下目标探测、海洋环境监测、水声通信和深海声学等领域取得了显著成果<sup>[1-4]</sup>。其频率无关的自然指向性,使得矢量传感器在低频和甚低频目标探测中展现出突出的应用潜力。然而,随着应用的不断深入,相关瓶颈问题也日益显现,其中最突出的是在实际环境中低频信号获

收稿日期:2025-06-23.

网络出版日期:2025-07-02.

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3104500);黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2023A009);海南省重点研发计划项目(ZDYF2024GXJS259).

作者简介:李智,男,副教授;

陈洪娟,女,教授,博士生导师;

张海刚,男,教授,博士生导师.

通信作者:李智,E-mail: zhili@hrbeu.edu.cn.

取效果不佳。这一问题既与传感器本身灵敏度有限有关,也与长期被忽视的关键因素-自噪声性能的不足密切相关。

矢量传感器的自噪声是指传感器本身的固有噪声,其产生仅与器件的材料、结构及电路等内部因素有关,而与外部环境无关。有时也被称为本底噪声,用于表征传感器可检测的最小信号量级。自噪声作为矢量传感器固有且独立于外部环境的重要性能参数,决定了其信号采集能力的下限,并对动态范围构成了关键限制。

早在 20 世纪 90 年代,国外学者便已开始对矢量传感器的自噪声问题展开研究。Schloss<sup>[5]</sup> 和 Gabrielson<sup>[6]</sup> 分别建立了加速度计和声传感器的自噪声理论模型,分析了电子热噪声与机械热噪声的来源与特性。在 2001 年美国海军组织的矢量传感器专题研讨会上,Gabrielson<sup>[6]</sup> 再次强调,自噪声是限制矢量传感器性能的关键因素,Benjamin<sup>[7]</sup> 和 Keltie<sup>[8]</sup> 则分别从信号与噪声场建模、悬挂安装等角度指出矢量传感器的自噪声问题仍面临诸多挑战。Butler 等<sup>[9]</sup> 分析了矢量传感器低频自噪声过高的原因,McConnell 等<sup>[10]</sup> 也在相关专利中指出该问题是低频弱信号接收的瓶颈所在。

相比之下,国内研究主要聚焦于矢量传感器的新材料、新结构、新技术及其应用等方向<sup>[11-14]</sup>,多以提升灵敏度为目标,鲜有涉及自噪声特性及其抑制机制的系统研究。这导致矢量传感器尽管在实验室或高信噪比环境中表现良好,但在实际弱信号采集效果常常不尽如人意。原因在于研究人员对矢量传感器系统自噪声的基本概念认知不足,噪声形成机理尚不清晰,导致难以准确识别主要噪声源,进而无法开展具有针对性的低噪声设计。尤其近年来,随着矢量传感器在低频远程探测领域的应用不断深入,低频自噪声偏高的问题日益突出,严重制约其性能潜力的进一步释放<sup>[15-17]</sup>。

本文围绕低噪声矢量传感器研究中的若干问题展开论述,包括自噪声的表征方法、最小系统分析模型的构建、低噪声设计原则的提出,以及样机的研制与测试等内容,旨在为提升矢量传感器的低噪声设计能力提供理论依据与技术参考。文中相关分析与方法对水听器的低噪声设计亦具有普遍适用性。

## 1 自噪声的表征

作为矢量传感器的固有特性,自噪声可从多个维度进行表征,例如不同的端口、物理量或形式等。尽管这些表征方式的关注角度不同,但均反映了自噪声的本质特性。

### 1.1 输入端与输出端表征

矢量传感器实现的是声能与电能之间的转换,

因此其自噪声可分别从输出端的电学量和输入端的声学量 2 个角度进行表征。

#### 1) 输出端。

在无外部输入信号条件下,矢量传感器内部元件、结构及电路所产生的噪声最终以电学量的形式出现在输出端。通常可直接测得的是电压量,称为噪声电压  $V_n$ ,单位是 V 或  $V/\sqrt{\text{Hz}}$ 。若采用谱级的表示方式,则其单位为 dB:

$$L_{V_n} = 20 \log \left( \frac{V_n}{V_{\text{ref}}} \right) \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{ref}} = 1 \text{ V}_{\text{rms}}$  是参考电压,有时也可以直接写作 dBV。

#### 2) 输入端。

输入端的噪声表征反映了矢量传感器对最小声学信号的感知能力。通常需根据传感器的灵敏度,将输出端的噪声电压折算为等效的输入端声学量。例如,将测得的噪声电压  $V_n$  经由声压灵敏度  $M_p$  转换后,即可得到等效输入噪声声压  $p_n$ ,从而以声学量形式表征自噪声性能:

$$p_n = V_n / M_p \quad (2)$$

式中  $p_n$  单位为  $\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。由于输入端噪声无法直接测量,通常需通过输出端噪声折算获得,因此在表述时一般加上“等效”一词,如将其表示为等效噪声声压级 (equivalent noise pressure level, ENPL),  $L_{p_n}$  以区别于可直接测得的输出端噪声电压:

$$L_{V_n} = 20 \log(p_n) = 20 \log V_n - 20 \log M_p \quad (3)$$

式中  $L_{V_n}$  单位为 dB,参考值为  $1 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

## 1.2 不同物理量的表征

当前常用的矢量传感器多为惯性式(同振式),其直接采集的是声场中的质点加速度,因此自噪声的本征量通常为加速度噪声。根据矢量传感器的不同类型,其本征自噪声的物理量也有所区别,利用平面波条件下的欧拉方程,可将等效噪声声压与其他物理量形式的自噪声进行换算,其关系为:

$$p_n = \rho c v_n = \frac{\rho c}{2\pi f} a_n = 2\pi f \rho c s_n \quad (4)$$

相应以“级”表示的,根据所需的参考单位进行转换即可。

### 1.3 噪声谱密度(级)与宽带噪声

通常噪声可通过某一频率下的谱密度或在一定带宽内的总能量进行描述。相应地,矢量传感器的自噪声也可采用谱密度(或谱级)与带内总噪声 2 种方式进行表征。

带内噪声用于描述在特定频率范围内的总噪声能量,属于宽带噪声范畴,使用时需明确频率上下限。而谱级则更常用于反映自噪声随频率的变化特

性:一方面,水声学研究普遍基于频率分析,海洋环境噪声也多以谱级形式表征;不同频段的噪声能量存在显著差异,因此谱级更符合水声学的分析习惯;另一方面,矢量传感器的自噪声并非理想白噪声,其频率特性明显,采用谱级形式更有助于揭示其特征,有利于噪声机理分析与低噪声设计优化。

根据噪声所在的位置以及其表征物理量的不同,表 1 对常见的自噪声表征方式进行了分类整理。相应以级表示的,根据所需的参考单位进行转换即可。

表 1 自噪声表征量及单位

位置	名称	符号	单位
输入端	带内噪声电压	$U_n$	$V(f_L \sim f_H \text{ Hz})$
	电压谱密度	$V_n$	$V/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
输出端	电压谱密度级	$L_{Vn}$	$\text{dB}@f_0 \text{ Hz (ref. } 1\text{V}/\sqrt{\text{Hz}})$
	等效噪声声压	$p_n$	$\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
	等效噪声声压级	$L_{pn}$	$\text{dB}@f_0 \text{ Hz (ref. } 1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}})$
输入端	等效噪声加速度谱密度	$a_n$	$\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$ 或 $\text{ms}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
	等效噪声振速谱密度	$v_n$	$\text{ms}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
	等效噪声声位移谱密度	$s_n$	$\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
	等效噪声声压梯度谱密度	$\nabla p_n$	$\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}@f_0 \text{ Hz}$
	带内噪声声压级	$L_n$	$\text{dB}@f_L \sim f_H \text{ Hz (ref. } 1\mu\text{Pa)}$

### 1.4 等效噪声声压与接收信噪比

部分空气声学及振动类传感器常采用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 表征自噪声性能。尽管该方法在水声传感领域应用较少,但为说明其与自噪声之间的关系,本文借用信号处理领域的定义对矢量传感器的 SNR 进行描述:当强度为 1 Pa 的平面波垂直入射至矢量传感器时,其输出电压为  $V$ ,则 SNR 可定义为该信号电压平方与输出端噪声电压的平方之比,即:

$$R_{\text{SNR}} = 10\log(V^2/V_n^2) = 120 + 10\log(M_p^2/V_n^2) = 120 - 10\log(p_n^2) \quad (5)$$

可见,SNR 的计算不仅反映了矢量传感器的自噪声水平,同时也依赖于其灵敏度参数,因此能够用于表征传感器的综合性能。通过简单推导可知,SNR 实际上可以用等效噪声声压  $p_n$  表示。这进一步说明,等效噪声声压不仅体现了传感器的固有噪声特性,同时也反映了其声电转换能力,是评价矢量传感器综合性能的重要指标。

## 2 自噪声最小系统分析模型

在矢量传感器自噪声分析中,最小系统的建立是获得准确噪声特性不可忽视的关键环节。无论采用何种类型的矢量传感器,其本质都是将声能直接

或间接转换为电能输出,因此在分析其自噪声性能时,电路部分不应被忽略。

一个完整的矢量传感器接收系统通常包括矢量传感部分、信号调理部分、模数转换部分以及数据接收终端,如图 1 所示。系统中各组成部分均会对整体噪声产生影响,且各级之间的级联还可能引入额外噪声。

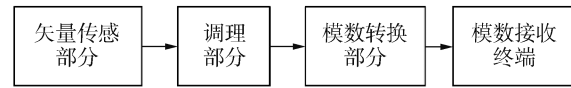


图 1 完整的矢量传感器系统

Fig. 1 Complete vector sensor system

图 1 中矢量传感部分由压电材料与敏感结构构成的探头以及悬挂结构组成,各自具有不同的噪声产生机制;信号调理部分包括前置放大电路、二级放大电路或滤波电路,主要功能是对传感器接收到的微弱信号进行放大,其噪声特性受到半导体器件类型和电路结构形式的影响;模数转换电路的噪声则主要来源于信号的量化过程,其作用是将模拟信号转换为数字信号,供数据接收终端显示或存储。

一般而言,为确保系统的信噪比,调理后的模拟噪声在进入模数转换模块前应显著高于其量化噪声。因此,在进行噪声分析时,可将模数转换部分的噪声影响忽略,以简化建模过程。本文以最常用的压电加速度型惯性式矢量传感器为例,建立并分析其自噪声最小系统模型。

### 2.1 自噪声模型及机理

惯性式压电矢量传感器的自噪声模型主要由矢量传感部分和前置放大部分构成。矢量传感部分由内置加速度计单元与悬挂单元组成,并通过电缆与前置放大部分相连接;前置放大部分包括前端级联的耦合单元和放大单元,如图 2 所示。各部分噪声的产生机理不同,且彼此独立;但由于系统各单元之间存在级联关系,耦合部分可能引入额外噪声并传递至输出端。最终,自噪声通过系统灵敏度换算,可等效表示为输入端的声学噪声量。

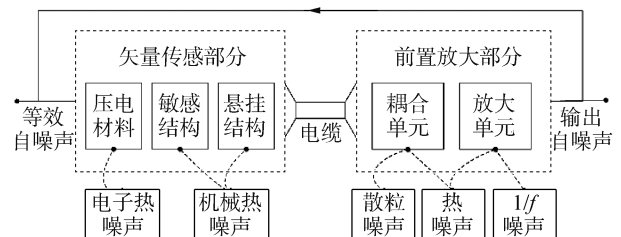


图 2 矢量传感器自噪声模型与机理

Fig. 2 Self-noise modeling and mechanisms of vector sensors

本文对各独立噪声源的机理进行详细分析,并在此基础上建立简化后的最小自噪声系统模型。

## 2.2 非相关噪声源

### 1) 加速度计。

加速度计是惯性式矢量传感器的核心敏感元件,其自噪声性能实质上决定了整个矢量传感器的噪声下限。因此,深入分析和理解加速度计的自噪声机理,是实现矢量传感器低噪声设计的关键。

压电加速度计的自噪声主要包括 2 部分:电子热噪声 (electric-thermal noise, ETN) 和机械热噪声 (mechanical-thermal noise, MTN)。ETN 来源于压电材料的介电损耗,是由热致极化涨落所产生的噪声,其本征表征量为输出端的噪声电压:

$$\overline{N_E^2} = 4k_B T \frac{\tan \delta}{\omega C_p} \quad (6)$$

式中:  $\tan \delta$  为压电材料的介电损耗;  $C_p$  是压电加速度计的静态电容。  $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K, 为 Boltzmann (玻尔兹曼) 常数;  $T$  为温度, K;  $\omega$  为角频率, rad/s。

机械热噪声 MTN 与加速度计的谐振特性密切相关,其本质同样属于热噪声:

$$\overline{N_M^2} = 4k_B T \frac{\omega_0 M_a^2}{mQ} \quad (7)$$

该模型的本征量为输入端的噪声加速度。因此,在表征加速度计的总自噪声时,需结合其灵敏度参数,将电子热噪声(以输出电压形式)与机械热噪声(以加速度形式)折算至同一端口,统一表征为输入端或输出端噪声量。

### 2) 电缆。

矢量传感器检测到的微弱信号需经导线或电缆传输至前置放大器输入端。若电缆较长且加速度计电容较小,其分布电容与漏电阻对系统自噪声的影响不可忽略。然而,在低噪声设计中通常将前置放大电路尽可能靠近加速度计布置,通过短导线引出信号,能够有效抑制该部分噪声贡献,因此在本文分析中可忽略不计。

### 3) 悬挂单元。

惯性式矢量传感器在工作时需配备悬挂系统,通常构成一个典型的弹簧-质量-阻尼振动系统,其自身振动特性会影响传感器的动态响应,并引入机械热噪声。由于不同设计中悬挂结构差异较大,为简化建模,本文假设悬挂系统与加速度计振动系统互不相关,可分别建模分析。已有研究表明<sup>[18]</sup>,悬挂系统引入的噪声主要影响传感器的最低工作频率附近,对中高端频段贡献有限,故在本模型中予以忽略。但需指出,在研究甚低频或极低频矢量传感器时,该部分噪声需重点考虑。

### 4) 放大电路。

由于压电矢量传感器为高阻抗信号源,相应的放大电路需具备高输入阻抗以实现良好匹配。常用

的放大方案包括集成运算放大器和结型场效应晶体管(junction field effect transistor, JFET)。已有大量研究和应用表明,基于分立器件 JFET 构建的放大电路可提供更优的噪声性能。相关电路结构与噪声分析已有较多成果,本文不再赘述。

## 2.3 最小噪声系统模型

根据前述分析,可建立矢量传感系统的最小噪声模型,主要包括图 2 所示的加速度计单元与前置放大部分。在该模型中,前置放大电路采用 JFET 结构实现,且假设其输出噪声电压远大于后续二级放大电路的输入噪声,从而可忽略后级噪声影响。据此构建的最小噪声系统分析电路如图 3 所示。

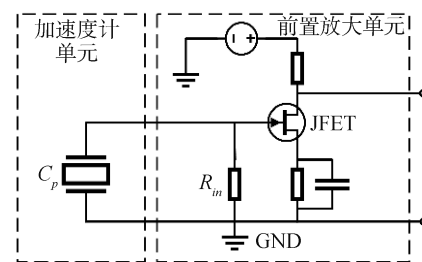


图 3 矢量传感器系统电路原理

Fig. 3 Circuit scheme of complete VS system

结合 2.1.1 节非相关噪声源的分析,对该电路进行推导,可得压电矢量传感器的总输出噪声电压  $V_n$  为:

$$\overline{V_n^2} = 4k_B T G^2 \left\{ \left[ \frac{\tan \delta}{\omega C_p} \right] + \left[ \frac{\omega_0 (\rho c M_p)^2}{\omega^2 m Q} \right] \right\} + \frac{1}{(\omega C_p)^2} \left\{ \left[ \frac{4k_B T}{R_{in}} \right] + [2qI_G] \right\} + N_{FET}^2 \quad (8)$$

进一步将其换算为等效输入端的噪声声压  $p_n$  为:

$$\overline{p_n^2} = 4k_B T \left\{ \left[ \frac{\tan \delta}{\omega C_p M_p^2} \right] + \left[ \frac{\omega_0 (\rho c)^2}{\omega^2 m Q} \right] \right\} + \frac{1}{(\omega C_p M_p)^2} \left\{ \left[ \frac{4k_B T}{R_{in}} \right] + [2qI_G] \right\} + \frac{1}{M_p^2} N_{FET}^2 \quad (9)$$

式(8)、式(9)均由 3 部分组成:右侧第 1 部分表示加速度计的本征自噪声,第 2 部分为耦合噪声,第 3 部分为 JFET 器件引入的噪声电压。式中:耦合噪声项中第 1 项反映了输入电阻的影响,第 2 项则表示噪声电流在加速度计电容上的作用所产生的噪声电压。

由此可见,输出噪声电压  $V_n$  与电路增益  $G$  成正比,而等效输入噪声声压  $p_n$  与  $G$  无关。单纯提高放大电路增益无法降低传感器的等效自噪声,也无法实质性提高系统的接收信噪比。

## 3 自噪声分析与低噪声设计

### 3.1 加速度计自噪声分析

根据式(6)和式(7),加速度计的总自噪声可视

为电子热噪声 (electronic thermal noise, ETN) 与机械热噪声 (mechanical thermal noise, MTN) 2 部分非相关噪声的叠加。显然,降低任意一部分的噪声均有助于降低总自噪声。

ETN 可通过选择介电损耗较小的压电材料以及提高传感器电容量实现。例如,弛豫铁电单晶的损耗因子 ( $\tan \delta \approx 0.2\%$ ) 相比常规压电陶瓷 ( $\tan \delta \approx 2\%$ ) 降低了一个数量级,理论上可将 ETN 降低约 20 dB,在低噪声设计中具有优势。此外,电容量越大,ETN 越低,但电容量通常与电压灵敏度成反比关系,因此设计时需综合权衡。需要特别指出的是,ETN 在低频下会显著升高,这也是低频与甚低频段自噪声难以有效降低的主要原因之一。

MTN 则取决于加速度计的动态特性参数,包括谐振频率、等效质量、品质因数以及加速度灵敏度等。这些参数相互耦合、互相制约,同时又是敏感结构设计的核心,因此难以通过单一变量控制实现噪声优化。

另一方面,ETN 与 MTN 在不同设计方案或应用场景下,其主导作用也会有所不同,设计时可根据实际需求进行权衡与取舍。为便于分析,本文选取一组典型矢量传感器参数进行计算:等效声压灵敏度  $M_p = -204 \text{ dB@ } 100 \text{ Hz}$ ,谐振频率为 2 050 Hz,等效质量为 15 g,品质因数为 50,静态电容为 8 nF,损耗因子为 1%。图 4 为该参数下 ETN、MTN 及加速度计总噪声的频率响应情况。

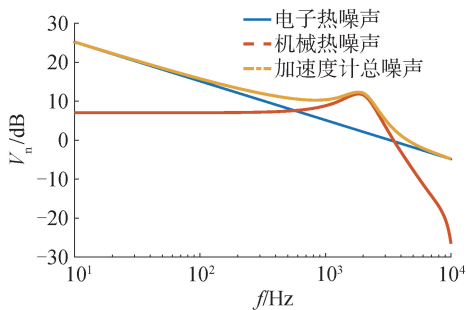


图 4 加速度计噪声成分分析

Fig. 4 Noise component analysis of accelerometers

可见,总噪声在不同频段的主要来源存在差异:低频段主要由 ETN 贡献,随着频率逐渐接近谐振频率,总噪声由 ETN 和 MTN 共同作用,最终以 MTN 为主导。一般来说,矢量传感器的工作频率位于谐振频率的 1/3 以下,此时加速度计的噪声主要由 ETN 贡献,因此压电材料的介电损耗和加速度计的电容量是实现低噪声设计的关键,应重点考虑;若采用谐振式加速度计作为矢量传感器的核心器件,则 MTN 成为加速度计低噪声设计的主要影响因素。

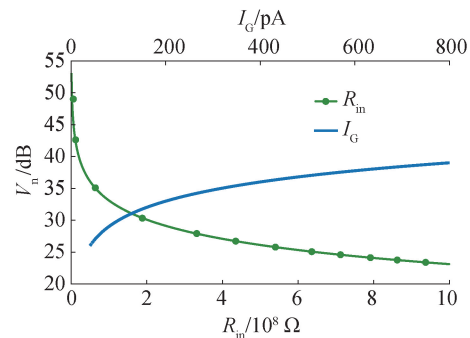
### 3.2 耦合噪声分析

耦合噪声包括由输入电阻产生的热噪声 (John-

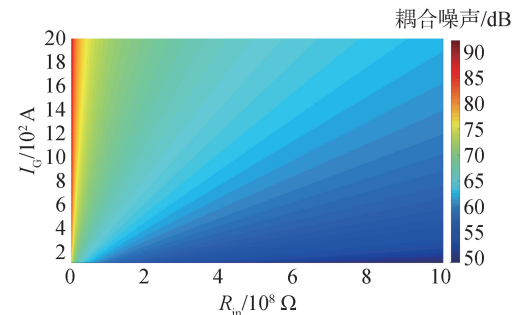
son 噪声) 以及由 JFET 散粒噪声引起的漏电流流经加速度计所产生的电压噪声。两者均随频率降低而增大。为分析两者对耦合噪声的贡献,以 100 Hz 频点处的噪声为例,研究栅极漏电流  $I_G$  和输入电阻  $R_{in}$  分别在 100~2 000 pA 和 1~1 000 M $\Omega$  范围内变化时的噪声表现。

图 5(a) 所示,耦合噪声的主要来源可在以下几种情况下明确判定:

- 1) 当  $R_{in}$  较小 (仅数兆欧姆) 时,输入电阻部分是耦合噪声的主要贡献者,即使  $I_G$  较大,其贡献仍远高于漏电流引起的电压噪声;
- 2) 当输入电阻较高 (约 500 兆欧姆以上) 且  $I_G$  较大 (约 800 pA 以上) 时,漏电流引起的电压噪声成为耦合噪声的主导部分;
- 3) 其他情况下,两者均对耦合噪声有一定贡献。



(a) 耦合噪声分量随输入参数变化



(b) 输入电阻与 JFET 漏电流对耦合噪声的影响

图 5 耦合噪声及参数影响分析

Fig. 5 Analysis of coupling noise and influencing parameters

图 5(b) 显示,通过增加输入电阻或选择漏电流较低的 JFET 器件,有助于降低耦合噪声对矢量传感器总噪声的影响。

### 3.3 最小系统低噪声设计

对于矢量传感器系统而言,各部分噪声之间的相互关系决定了低噪声设计的重点方向。由于系统参数众多,且相互影响、相互制约,部分参数又与实际器件性能密切相关,因此降低矢量传感器自噪声需要进行细致的分析与设计。以下通过数值计算,展示几种矢量传感器低噪声设计中常见的典型情况。

基于最小噪声系统模型,矢量传感系统参数如表 2 所示。系统谐振频率设定约为 2 050 Hz,100 Hz 处的等效声压灵敏度为 -230 dB (re. 1 V/ $\mu$ Pa),且在 1 000 Hz 以下遵循每倍频程 6 dB 的衰减规律。JFET 的噪声电压随频率降低而升高,分别设定为 3.37 nV@10 Hz、2.95 nV@100 Hz 和 2.29 nV@1 kHz,其他频点的噪声电压通过差值计算获得。

表 2 矢量传感系统参数设置

参数	$\tan \delta / \%$	$M_p / \text{dB}$	$m / \text{g}$	$Q$	$C_p / \text{nF}$	$R_{in} / \text{M}\Omega$	$I_G / \text{pA}$
数值	2	-230	15	50	10	100	100

1) 压电功能材料介电损耗。

基于上述参数,利用式(8)计算得到矢量传感器的总输出噪声电压及各组成部分噪声(见图 6)。在本算例中,矢量传感器的总噪声几乎完全由加速度计贡献。前文分析表明,主要原因是压电材料介电损耗较高,电子热噪声占主导地位,导致加速度计噪声水平偏高。

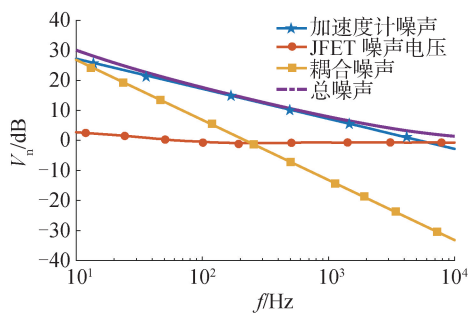


图 6 算例 1-矢量传感器总噪声及各部分噪声分布  
Fig. 6 Case 1-total noise and noise components of the vector sensor

在其他参数保持不变的情况下,将压电材料的介电损耗降低至 0.2%,如图 7 所示,电子热噪声显著减少,从而使加速度计噪声下降,导致总噪声组成发生明显变化。低频段的主要噪声成分为耦合噪声:一方面,尽管噪声电流较弱,但压电传感器容抗较高,导致噪声电压较大;另一方面,加速度型矢量传感器在低频段的灵敏度较低,这两者综合导致低频耦合噪声偏高。随着频率升高,传感器容抗逐渐降低,灵敏度增加,加速度计噪声贡献逐渐显著;在更高频段,JFET 噪声电压成为主导,其原因在于频率依赖的加速度计噪声和耦合噪声明显降低,二者产生的噪声电压远小于 JFET 噪声电压。且 JFET 在高频时的噪声电压主要为热噪声,基本不随频率变化。

2) 声压灵敏度。

声压灵敏度与 ENPL 呈现高度相关性。仍以上述参数为基础,仅考虑灵敏度变化对 ENPL 的影响:

以该算例中 100 Hz 处灵敏度为 -230 dB 为参考,图 8(a)以  $f=100$  Hz 的曲线为例,随着灵敏度的提升,ENPL 近似按比例下降,但当灵敏度增加到一定程度后,ENPL 下降趋于缓慢,随后趋于平稳,不再继续随灵敏度提升而降低。

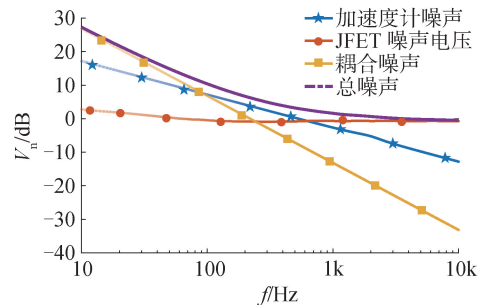
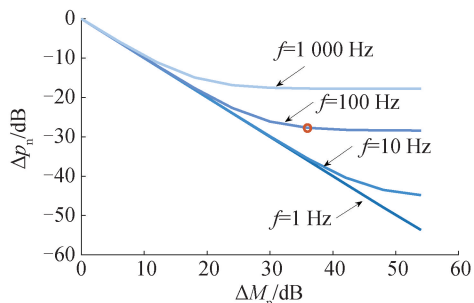
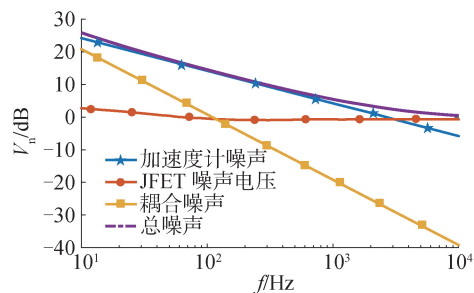


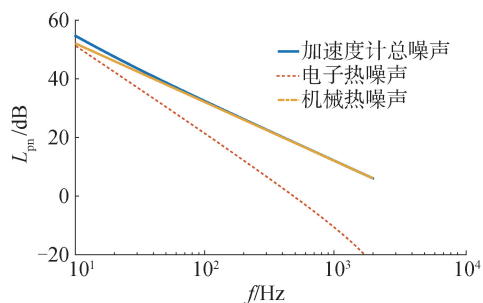
图 7 算例 2-介电损耗降低后矢量传感器噪声分布情况  
Fig. 7 Case 2-distribution of individual noise components in the vector sensor after dielectric loss reduction



(a) 灵敏度变化与等效噪声声压级变化关系



(b) 矢量传感器噪声组成分析



(c) 加速度计噪声组成分析

图 8 算例 3-声压灵敏度对矢量传感器噪声影响分析  
Fig. 8 Case 3-influence of acoustic sensitivity on vector sensor noise

对该平缓区段(灵敏度为 -194 dB@100 Hz)下的噪声分布进行分析(图 8(b))可见,此时噪声主

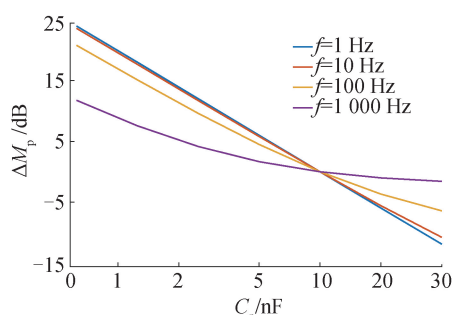
要来源于加速度计。进一步分析加速度计的噪声构成(图 8(c))发现,其噪声主导项已转变为 MTN。这是由于当灵敏度足够高时,本征输出端的 ETN 已显著降低,而输入端的 MTN 不随灵敏度变化,因此在高灵敏度下成为主要噪声来源。

因此,单纯提高灵敏度在达到一定阈值后已难以进一步降低 ENPL,且频率越高,这一现象越明显。

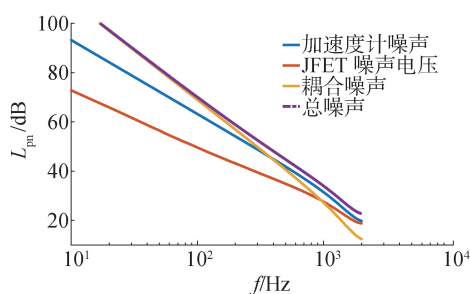
需要指出的是,声压灵敏度与等效质量、品质因数及谐振频率等参数密切相关,设计时需综合权衡。

### 3) 静态电容量。

电容量是影响低噪声矢量传感器性能的重要因素。以算例 1 中的电容量  $C_p = 10 \text{ nF}$  为基准,在其他参数保持不变的情况下,对电容量按倍数进行增减(范围为  $630 \text{ pF} \sim 40 \text{ nF}$ ),得到 ENPL 随电容量变化倍数的变化曲线,如图 9(a)所示。



(a) 电容量变化与等效噪声声压级变化关系



(b) 矢量传感器噪声组成分析

图 9 算例 4—电容量对矢量传感器噪声影响分析

Fig. 9 Case 4—analysis of capacitance influence on vector sensor noise

在较低频率(如 1 Hz 和 10 Hz)下,ENPL 基本随电容量线性变化,即电容量减小时,ENPL 按比例上升;而随着频率升高,曲线斜率逐渐减小,说明电容量对 ENPL 的影响减弱。这是因为电容主导的噪声部分与频率有关,其贡献会随着频率升高而减少,反之在低频下则影响更为显著。因此,在低频低噪声设计中,传感器的电容量应受到特别关注。

不能忽视的是,电容量的变化通常与等效声压

灵敏度呈现相反趋势,两者对 ENPL 的影响需要综合权衡,才能实现低噪声设计的目标。

### 4) 低噪声设计原则。

在考虑自噪声问题时,不能孤立地讨论系统某一部分,否则难以开展实用化样机设计。由于矢量传感系统的复杂性,各部分相互影响、互相制约,设计时需结合具体需求进行权衡。此外,成本也是必须考虑的重要因素,过高的低噪声要求会导致器件成本上升,因此应满足实际需求即可。

① 矢量传感器系统的自噪声与频率密切相关,低噪声设计应首先明确工作频率,基于此开展自噪声分析与优化;

② 通常情况下,矢量传感器自噪声的主要贡献随频率由低到高依次为:耦合噪声、加速度计噪声和 JFET 噪声电压。在部分频段,系统噪声由多种成分共同贡献,需进行综合设计;

③ 在材料和器件条件允许范围内,尽量降低各不相关噪声源的单独噪声;

④ 压电材料应尽量选用介电损耗低且压电电压常数高的类型,以提高灵敏度并降低电子热噪声;

⑤ 可适度降低电容以提升灵敏度,从而降低总自噪声,但需注意低频时输入电阻匹配问题,过高的输入电阻可能引起电路不稳定。应优先通过优化传感器结构提升灵敏度,而非简单采用电容的串并联方式;

⑥ 对于较低工作频率,可采用分立器件构建前置放大电路,以有效降低低频耦合噪声;中高频段经过低噪声设计后,可选用低噪声运算放大器简化系统设计;

⑦ 对于较高工作频率,经过加速度计和耦合噪声的低噪声设计后,可在工作频带内单独关注前置放大电路的低噪声特性。

此外,传感器探头与前置放大电路之间的电缆应尽量缩短,以减少因电缆抖动产生的摩擦电噪声及分布电容带来的灵敏度损失,从而降低自噪声。

总之,矢量传感器系统的低噪声设计是一项复杂的综合性工作,需要结合工作频率、应用环境及成本等因素全面考量。

## 4 样机研制及测试

### 4.1 低噪声弛豫铁电单晶样机

图 10 为所研制的低噪声矢量传感器样机。样机采用弛豫铁电单晶有源功能材料设计的加速度计,介电损耗为 0.16%,加速度计等效质量为 10.4 g,品质因数  $Q$  为 48.6,电容为 4.2 nF。矢量传感器在 100 Hz 处的等效声压灵敏度为  $-200.8 \text{ dB}$ ,其余参数与表 2 一致。



图 10 弛豫铁电单晶矢量传感器样机

Fig. 10 Prototype of relaxor ferroelectric single crystal vector sensor

根据上述方法预测,矢量传感器的自噪声约为 38.5 dB@100 Hz。60 Hz 以下频段的总噪声主要由耦合噪声贡献;在 60~140 Hz,噪声由加速度计噪声和耦合噪声共同贡献;而在 140 Hz 以上较高频段,噪声则主要由加速度计贡献。

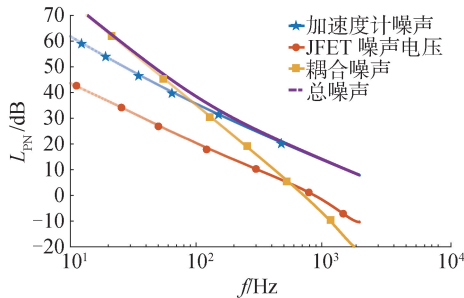


图 11 样机噪声来源分析

Fig. 11 Noise source analysis of the prototype

为对比自噪声性能,采用相同结构和尺寸,仅将有源功能材料替换为 PZT-5H,研制了压电陶瓷比试样机作为对照测试样机。

#### 4.2 自噪声测试及结果分析

低噪声特性的表征依赖于高精度的自噪声测量技术。矢量传感器自噪声测量的主要挑战在于抑制环境干扰。对于声学及振动传感器,环境干扰主要包括 3 类:背景噪声、振动和电磁干扰。矢量传感器相比传统声压水听器对振动信号更为敏感,且多应用于低频段,因此低频振动干扰的隔离成为关键问题。团队研制了具备抗噪声干扰能力的测试系统<sup>[18-19]</sup>,并研究了双通道传递函数法用于抑制环境噪声干扰<sup>[20-21]</sup>,显著提升了矢量传感器低频自噪声测试的能力。图 12 展示了本文研制的弛豫铁电单晶与压电陶瓷矢量传感器样机在自噪声测量系统中的测试工况。图 13 为弛豫铁电单晶样机的实测 ENPL 与预测结果的对比。

需要说明的是,弛豫铁电单晶在粘接过程中介电损耗存在变化,导致实际测量值与自由状态下测量值存在较大差异。因此此处对预测值进行了误差处理,将介电损耗的不确定性纳入预测,选取变化范

围为 0.16%~1.2%,中间值为 0.5%。100 Hz 处实测 ENPL 为 40.7 dB,预测值为 41.2 dB,二者吻合良好;但在 25~80 Hz,实测值与理论值存在较大偏差,主要原因包括工频干扰及传感器悬挂方式引入的干扰。



图 12 自噪声测量工况

Fig. 12 Setup of self-noise measurement

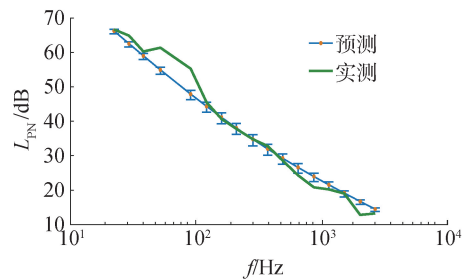


图 13 样机预测与实测结果对比

Fig. 13 Predicted and measured self-noise of prototype

将弛豫铁电单晶样机与压电陶瓷样机的自噪声结果进行对比(见图 14);弛豫铁电单晶样机的自噪声在各频段均低于压电陶瓷样机,其中 100 Hz 频点处 ENPL 降低了 11.7 dB。低频低自噪声的优势体现在实际接收系统中,背景噪声由环境噪声和自噪声叠加而成,当环境噪声降低至一定程度时,更低的自噪声将进一步降低整体背景噪声,从而提升接收信噪比。此现象在低频段尤为明显,因为低频环境噪声通常较高。具体情况有待未来通过精细设计和实验验证。

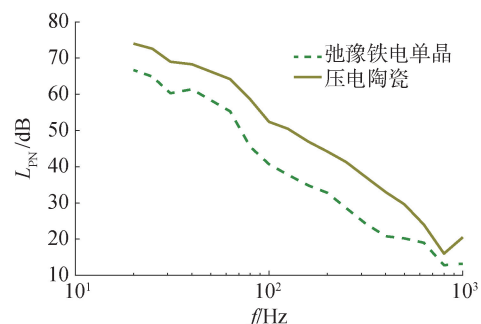


图 14 弛豫铁电单晶与陶瓷样机自噪声对比

Fig. 14 Self-noise comparison between relaxor ferroelectric single crystal and ceramic prototypes

将本文研制矢量传感器与已有公开文献的实测 ENPL<sup>[19,22-24,26-27]</sup>进行对比,如图 15 所示。采用内置国外加速度计的矢量传感器样机在约 200 Hz 以上频带的自噪声低于 Knudsen 零级海况(sea states zero, SS0)海洋环境噪声<sup>[19]</sup>,但由于加速度计噪声性能已固化,低频噪声难以进一步降低,限制了其在低频率信号拾取方面的能力;Wlodkowski 等<sup>[22]</sup>研制的弛豫铁电单晶矢量传感器,在约 100 Hz 以上频率实现了低于 Knudsen SS0 的自噪声,初步验证了弛豫铁电单晶材料在自噪声性能方面的优势。弛豫铁电单晶十字圈梁和双臂梁矢量传感器<sup>[23-25]</sup>,自噪声显著降低,在 60 Hz 以上频率均低于 Knudsen SS0,100 Hz 处低于 Knudsen SS0 近 10 dB,满足低噪声弱信号采集需求,但更低频段噪声仍较高,限制了其在甚低频应用的效果。本文研制的样机自噪声较前期样机整体降低约 10 dB,在 20 Hz 以上频率全面低于 Knudsen SS0,100 Hz 以上也已全面低于 Wenz's SS0<sup>[27]</sup>,不仅显著提升了接收信噪比,对差分型高阶矢量阵的应用也具有重要意义。

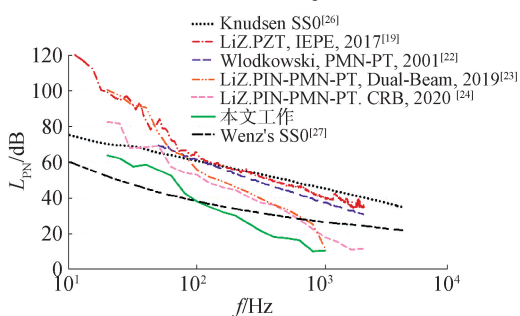


图 15 多类样机自噪声实测结果对比

Fig. 15 Self-noise comparison of multiple prototypes

## 5 结论

1) 本文研究了惯性式矢量传感器的自噪声机理,明确了自噪声的基本表征方式,构建了包含加速度计与前置放大电路的最小系统噪声模型,提出自噪声预测方法有效。

2) 围绕低噪声矢量传感器设计中的若干关键问题,研制了基于弛豫铁电单晶的矢量传感器样机。测试结果表明:其在 100 Hz 频点的等效噪声声压级为 40.7 dB(ref. 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ ),与预测值一致,较传统压电陶瓷样机降低 11.7 dB,自噪声在 20 Hz 以上频段全面低于 Knudsen SS0、100 Hz 以上低于 Wenz SS0,本文低噪声设计方法具有可行性。

3) 本文成果为矢量传感器低噪声特性提升提供了理论支撑与工程参考。

## 参考文献:

[1] YANG Shie. Directional pattern of a cross vector sensor ar-

ray[J]. The journal of the acoustical society of America, 2012, 131(supp4): 3484-3484.

- [2] SMITH K B, LEARY P, DEAL T, et al. Acoustic vector sensor analysis of the monterey bay region soundscape and the impact of COVID-19[J]. The journal of the acoustical society of America, 2022, 151: 2507-2520.
- [3] 孙梅, 周士弘, 李整林. 基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用[J]. 物理学报, 2016, 65: 094302. SUN Mei, ZHOU Shihong, LI Zhenglin. Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application[J]. Acta physica sinica, 2016, 65(9): 147-155.
- [4] WANG Chi, YIN Jingwei, HUANG Defeng, et al. Experimental demonstration of differential OFDM underwater acoustic communication with acoustic vector sensor[J]. Applied acoustics, 2015, 91: 1-5.
- [5] SCHLOSS F. Accelerometer noise[J]. Sound and vibration, 1993, 27: 22-22.
- [6] GABRIELSON T B. Fundamental noise limits for miniature acoustic and vibration sensors[J]. Journal of vibration and acoustics, 1995(4), 117: 405-410.
- [7] CRAY B A. Directional acoustic receivers: signal and noise characteristics[C]//Proc. of the Workshop of Directional Acoustic Sensors. 2001.
- [8] KELTIE R F. Vector sensor modeling and support bracket design[C]//Proceedings of the Workshop on Directional Acoustic Sensors. Newport RI, 2001.
- [9] BUTLER J L, SHERMAN C H. Transducers and arrays for underwater sound[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2017. 336-337.
- [10] MCCONNELL J A, ABRAHAM B M, JENSEN S C, et al. Acoustic vector sensor having an accelerometer with in-band resonant frequency[P]. US: 9,016,129, B2, 2015-04-28.
- [11] 李俊红, 魏建辉, 马军, 等. ZnO 薄膜硅微压电矢量水听器[J]. 声学学报, 2016, 41(3): 273-280. LI Junhong, WEI Jianhui, MA Jun, et al. ZnO thin film piezoelectric vector hydrophone[J]. Acta acustica, 2016, 41(3): 273-280.
- [12] 涂馨予, 李俊宝, 刘晓迪. 用于矢量水听器的低频高灵敏度层合梁加速度传感器[J]. 声学学报, 2021, 46(4): 623-632. TU Xinyu, LI Junbao, LIU Xiaodi. Low-frequency and high-sensitivity laminated beam accelerometer for vector hydrophone[J]. Acta acustica, 2021, 46(4): 623-632.
- [13] 赵龙江, 冯杰, 冯晖, 等. 用于空气声测量的质点振速传感器[J]. 声学学报, 2015, 40(4): 598-606. ZHAO Longjiang, FENG Jie, FENG Hui, et al. A particle velocity sensor for airborne sound measurement[J]. Acta acustica, 2015, 40(4): 598-606.
- [14] 王文龙, 孙芹东, 王超, 等. 大深度复合同振式矢量水听器设计[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 149-158. WANG Wenlong, SUN Qindong, WANG Chao, et al. Design of large depth combined co-vibrating vector hydrophone[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 149-158.
- [15] 杨士莪. 矢量传感器多极子化组合前景[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 101-102.

- YANG Shie. Perspective of multi-pole-forming by vector sensor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 101-102.
- [16] GUO Xijing, YANG Shie, MIRON S. Low-frequency beamforming for a miniaturized aperture three-by-three uniform rectangular array of acoustic vector sensors[J]. The journal of the acoustical society of America, 2015, 138(6): 3873-3883.
- [17] GUO Xijing, MIRON S, YANG Yixin, et al. An upper bound for the directivity index of superdirective acoustic vector sensor arrays[J]. The journal of the acoustical society of America, 2016, 140(5): EL410-EL415.
- [18] 李智. 低噪声矢量水听器设计及其校准方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- LI Zhi. Design of low noise vector hydrophone and its calibration method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [19] 李智, 杨士莪, 陈洪娟. 压电矢量传感器的低噪声设计[J]. 声学学报, 2018, 43(4): 432-444.
- LI Zhi, YANG Shie, CHEN Hongjuan. Low-noise design of piezoelectric vector sensor[J]. Acta acustica, 2018, 43(4): 432-444.
- [20] 李智, 陈洪娟, 张虎. 双通道传递函数法测量矢量水听器自噪声[J]. 声学技术, 2017, 36(6): 602-605.
- LI Zhi, CHEN Hongjuan, ZHANG Hu. Self-noise measurement of vector sensor by using dual-channel transfer function method[J]. Technical acoustics, 2017, 36(6): 602-605.
- [21] LI Zhi, CHEN Hongjuan. Method for measuring self-noise of vector hydrophones[J]. Journal of marine science and application, 2017, 16(3): 370-374.
- [22] WLODKOWSKI P A, SCHLOSS F. Advances in acoustic particle velocity sensors[C]. Proceedings of the Workshop on Directional Acoustic Sensors. Newport, 2001.
- [23] LI Z. Development of Low-noise Vector Sensor using Bending Mode Relaxor Ferroelectric Single Crystal Materials[C]. 5th Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos CRETE, 2019: 955-961.
- [24] LI Z, YANG S E, WANG S H, et al. Development of a new kind low frequency low-noise vector sensor[J]. Sensors and actuators a: physical, 2020, 301: 111743.
- [25] 李智, 杨士莪. 水声矢量传感器研究进展与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 1-19.
- Li Zhi, Yang Shi'e. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2024, 45(11): 1-19.
- [26] KNUDSEN V O R, ALFORD R S, EMLING J W. Underwater ambient noise[J]. Journal of Marine Research, 1948, 7(3): 410-429.
- [27] WENZ G M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. The journal of the acoustical society of America, 1962, 34(12): 1936-1956.

### 本文引用格式:

李智, 陈洪娟, 张海刚, 等. 低噪声矢量传感器研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1650-1659.

Li Zhi, Chen Hongjuan, ZHANG Haigang, et al. Study on low-noise acoustic vector sensors[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1650-1659.