

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514131

水听器等效噪声谱级测量技术研究

王大成^{1,2,3}, 王有国^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学海洋信息获取与安全工信部重点实验室 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要:水听器是声纳系统获取水声信息不可缺少的组件,其自身噪声水平直接影响声纳的性能。不论在水听器研制阶段,还是在使用维护阶段,准确掌握水听器等效噪声谱级十分必要。针对水听器等效噪声极其微弱,测量过程易受外部环境中声音、振动和电磁波干扰的问题,故提出隔音、减振、电磁屏蔽相结合的测量环境构建方案。以构建的良好测量环境为基础,进一步运用低噪声前置放大电路设计和平均周期图功率谱估计方法,完成对水听器等效噪声谱级的准确测量。给出了减振与电磁屏蔽效果的估算方法,以及有效抑制电路噪声的措施。利用提出的方法研制了测量系统。对测量系统隔音和电磁屏蔽效果进行了实测,其中声衰减>70 dB,电磁衰减>60 dB,能够很好满足实际使用要求。通过实测结果验证了平均周期图功率谱估计方法的有效性,并得出了对于不同测量频段,用户应选择合适的总采集时长和分段数量,以平衡测量效率与测量精度的结论。最后,使用测量系统对 RESON 公司生产的低噪声水听器 TC4014 进行了等效噪声谱级测量。测量结果表明:实测获得的 TC4014 等效噪声谱级曲线与官方给出的曲线吻合,验证了所提出方法的有效性。

关键词: 水听器;等效噪声谱级;测量系统;屏蔽效果;平均周期图

中图分类号: TH71 P716 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on hydrophone equivalent noise spectrum level measurement technology

Wang Dacheng^{1,2,3}, Wang Youguo^{1,2,3}

(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, Harbin 150001, China;
3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The hydrophone is an indispensable component of sonar systems for acquiring underwater acoustic information, and its inherent noise level directly impacts sonar performance. It is essential to accurately determine the equivalent noise spectrum level of a hydrophone, both during its development phase and throughout its operation and maintenance stages. This article addresses the challenge that hydrophone equivalent noise is extremely weak and its measurement process is susceptible to interference from external environmental sounds, vibrations, and electromagnetic waves. This study proposes a measurement environment construction scheme combining sound insulation, vibration reduction, and electromagnetic shielding. Building upon this well-constructed measurement environment, we further employ low-noise preamplifier circuit design and the averaged periodogram power spectrum estimation method to achieve accurate measurement of the hydrophone equivalent noise spectrum level. The article provides estimation methods for vibration reduction and electromagnetic shielding effectiveness, along with measures to effectively suppress circuit noise. A measurement system is developed using the proposed method. The sound insulation and electromagnetic shielding effectiveness of the system are tested, showing an acoustic attenuation greater than 70 dB and an electromagnetic attenuation greater than 60 dB, effectively satisfying practical requirements. The effectiveness of the averaged periodogram power spectrum estimation method is evaluated through experimental results. It is also concluded that for different measurement frequency bands, users should select appropriate total acquisition duration and segment numbers to balance measurement efficiency with accuracy. Finally, the measurement system is used to determine the

equivalent noise spectrum level of the RESON TC4014 low-noise hydrophone. The results show that the experimentally obtained equivalent noise spectrum curve for the TC4014 coincides with the curve provided by the manufacturer, validating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: hydrophone; equivalent noise spectrum level; measurement system; shielding effectiveness; averaged periodogram

0 引 言

水听器能将水声信号转换为电信号,是水下声纳系统获取水声信息不可缺少的组件^[1]。水听器输出的电信号中包含有水听器自身产生的噪声,且电噪声能够等效成声噪声^[2-3]。国际电工委员会在 2017 年发布的有关水听器的标准中,已把等效噪声水平列入水听器选型时的主要参考指标^[4]。国际知名水听器生产厂家通常都在低噪声水听器产品的说明中给出等效噪声谱级曲线。国内水声领域相关学者对水听器等效噪声指标的重视程度也在不断提升^[5-9]。

为获得准确的水听器等效噪声测量结果,需要找到有效的测量方法,构建精准的测量系统。1996 年,美国海军空战研发中心在相关研究中,分析了水听器等效噪声的来源,并介绍了一种采用弹簧悬挂结构的测量系统^[10]。2017 年陈毅等^[11]给出了水听器等效噪声压测量原理和基本测量条件要求。同年 Li 等^[12]提出了一种利用双通道传递函数法抑制矢量水听器等效噪声测量过程中外部环境噪声干扰的方法。2018 年 Zaitsev 等^[13]在测量一种水听器的等效噪声时,尝试采用泡沫作为隔音减振材料。2020 年 Krishnakumar 等^[14]强调了在测量水听器等效噪声时,电磁屏蔽和人为制造真空隔音环境的重要性。2021 年 Yang 等^[15]在测量自己研制的微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)水听器时,给出了一种实现隔音环境的结构。

以上关于水听器等效噪声测量的研究,不是只给出测量结果,未提及测量方法,就是在诸多理想假设的前提下,从某个单一角度介绍等效噪声测量的相关技术。目前,国内所有水声换能器厂家都提供自己生产的水听器等效噪声谱级数据,但都是各自测量,且测量方法和设备各异,尚无计量站提供水听器等效噪声谱级计量服务。现以完整构建一套水听器等效噪声测量系统为出发点,全面讨论了声、电磁静默测量环境构建、低输入等效噪声前置放大电路设计和高精度等效噪声谱估计等问题,给出了具体的技术解决方案。

1 水听器等效噪声

对于一台理想的水听器,其输出的电信号只与激励它的声信号有关。然而,不论采用什么材料制作的水听器,其输出电压信号中都会包含材料内电子热运动产生的随

机电压波动噪声。若水听器集成了前置放大电路,则其输出电压信号中还会包含放大电路带来的电噪声。这些非声引起的水听器电压波动通常称为水听器自噪声。若将自噪声等效成声信号激励引起的,结合灵敏度指标,可以更准确地评价水听器的自身噪声水平,因此引入水听器等效噪声概念。通过测量水听器输出噪声幅度谱 $NS(f)$,可以利用式(1)计算水听器等效噪声谱级 $NL(f)$,即:

$$NL(f) = 20\lg(NS(f)) - ML(f) \quad (1)$$

式中: $ML(f)$ 为水听器灵敏度级。

对于未集成前置放大器的水听器,其等效噪声电压幅度谱密度为:

$$S_{NH} = \sqrt{4KTR_h} \quad (2)$$

其中, K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, R_h 为水听器等效电阻,即水听器输出阻抗 Z_h 的实部。

为确保接收宽带信号时不出现失真,水听器通常工作在远低于谐振频率的灵敏度曲线相对平坦的频段。此时,水听器等效电阻可表示为:

$$R_h = \frac{\tan(\delta)/(\omega cf) + k^2 R_r C^E / (\eta_m cf)}{1 + \tan^2(\delta)} \quad (3)$$

其中, $\tan(\delta)$ 为损耗因子, ω 为频率, cf 为水听器自由电容, k^2 为耦合系数, R_r 为辐射阻, C^E 为柔顺系数, η_m 为机械效率。

为表明一般压电式水听器等效噪声幅度的量级大小,利用式(2)、(3)仿真计算了一种球形水听器在 5~40 kHz 的等效噪声谱密度,结果如图 1 所示。仿真中设定球形水听器的外径为 4 cm,壁厚为 0.2 cm,材料为压电陶瓷 PZT-4。

图 1 中水听器噪声谱密度随频率的增加而减小,在频率 > 100 Hz 时,低于 $10 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$,可见水听器输出噪声幅度非常低,必须采取良好的隔声、隔振及电磁屏蔽措施,才能有效抑制外部环境干扰,保证等效噪声级测量结果的准确性。

水听器等效噪声谱级与海洋环境噪声谱级进行比较,可以直观清晰地描述水听器的等效噪声水平。若水听器等效噪声谱级低于海洋环境噪声谱级,说明水听器等效噪声与海洋环境噪声比较,对声纳系统性能的影响处于次要地位,通常认定水听器等效噪声性能指标合格。在不同海域,不同时间,0 级海况海洋环境噪声也会不同,行业内一般会引用 Kundson 海洋环境噪声谱作为参考标准^[16]。图 2 给出了与图 1 中噪声谱密度相应的水听器等效噪声谱级曲线。

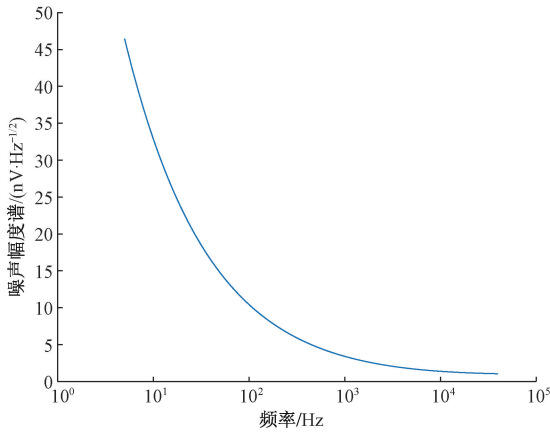


图1 水听器输出噪声谱密度

Fig. 1 Hydrophone output noise spectral density

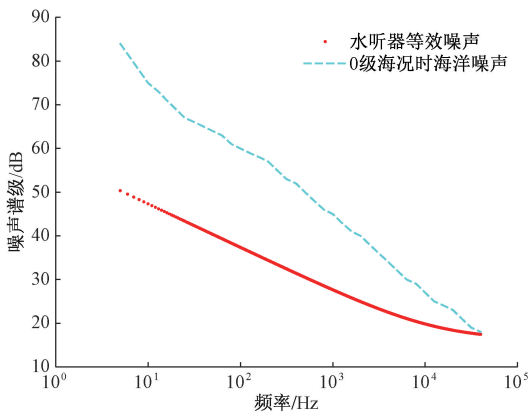


图2 水听器等效噪声谱级

Fig. 2 Equivalent noise spectrum level of hydrophone

2 测量环境构建

为构建声与电磁均静默的测量环境,设计了如图3所示的复合腔体结构。结构的主体为内、外嵌套的两个金属罐。外罐采用气密设计。外罐的顶盖外侧安装有带气阀开关和真空表的三通接头,用于抽空罐内空气;内侧安装有4根拉伸弹簧,用于悬挂内罐。外罐底端安装有4个空气弹簧隔振基座。内罐中安装采集电路和待测水听器。内罐的顶盖开有导气孔,当进行抽真空操作时,内罐中的空气也会被抽出。

2.1 隔振

图3中的内、外金属罐,拉伸弹簧和空气弹簧隔振基座共同构成一个二级隔振系统,其力学模型如图4所示。由于空气弹簧阻尼非常小,在隔振计算时可以忽略不计。

内金属罐为隔振体,质量为 m_1 ;外金属罐为中间物体,质量为 m_2 ; k_1 为拉伸弹簧的劲度系数; C 为拉伸弹簧

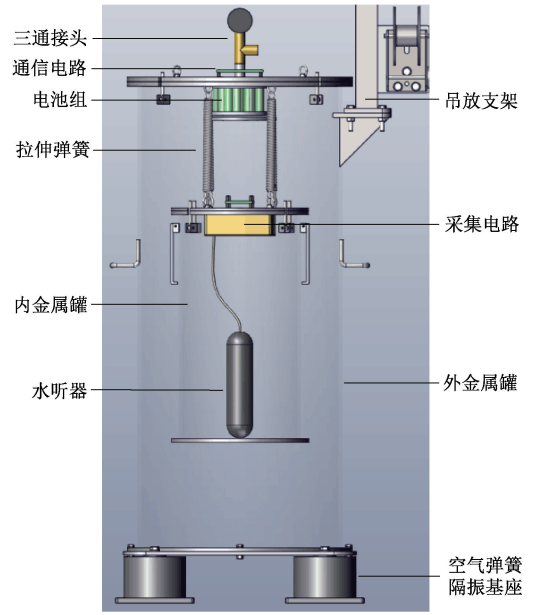


图3 结构设计

Fig. 3 Structural design

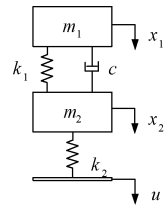


图4 隔振系统的力学模型

Fig. 4 Mechanical model of the vibration isolation system

的阻尼系数; k_2 为空气弹簧的劲度系数;假设基座振动位移为 u ,外金属罐位移为 x_2 ,内金属罐振动位移 x_1 ;则两级隔振系统运动方程组为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + C \dot{x}_1 + k_1 x_1 - C \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + C \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - C \dot{x}_1 - k_1 x_1 = k_2 u \end{cases} \quad (4)$$

选取零初始条件,将式(4)作拉氏变换,得到两个复代数方程,即:

$$(m_1 s^2 + cs + k_1) X_1(s) - (cs + k_1) X_2(s) = 0 \quad (5)$$

$$(m_2 s^2 + cs + k_1 + k_2) X_2(s) - (cs + k_1) X_1(s) = k_2 U(s) \quad (6)$$

再令 $p_{11} = (m_1 s^2 + cs + k_1)$, $p_{12} = -(cs + k_1)$, $p_{22} = (m_2 s^2 + cs + k_1 + k_2)$,并从式(5)和(6)中消去 $X_2(s)$,得到两级隔振系统的传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{p_{12} k_2}{p_{11} p_{22} - p_{12}^2} \quad (7)$$

$$\text{再引入参数 } \omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, \omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, f = \frac{\omega_2}{\omega_1}, g = \frac{\omega}{\omega_1},$$

$$c_c = 2(m_1 k_1)^{\frac{1}{2}}, \xi = \frac{c}{c_c}.$$

令 $s = j\omega$ 可得该两级隔振系统频率特性 $G(j\omega)$, 进而可求得两级隔振系统的振动传递率 T 。

$$T = \sqrt{\frac{a^2(1+b)}{[a-d-ag^2+\mu g^4]^2 + b[a-d]^2}} \quad (8)$$

其中, $a = \mu f^2, b = 4\xi^2 g^2, d = (1 + \mu) g^2$ 。

当取真空罐质量 $m_2 = 223 \text{ kg}$ 、内金属罐质量 $m_1 = 44 \text{ kg}$ 、拉伸弹簧的阻尼系数 $C = 4.96$ 、拉伸弹簧劲度系数 $k_1 = 5\,600 \text{ N/m}$ 、空气弹簧的劲度系数 $k_2 = 150\,000 \text{ N/m}$ 时, 利用式(8)可获得该二级隔振系统对外部振动的衰减量 $IL = 20\lg(T)$, 如图5所示。可见, 以上二级隔振系统有两个共振频率: $\omega_1 = 1.8 \text{ Hz}$ 和 $\omega_2 = 4.2 \text{ Hz}$; 干扰频率为 100 Hz 时振动衰减 $>120 \text{ dB}$, 干扰振动频率越高振动衰减越大。

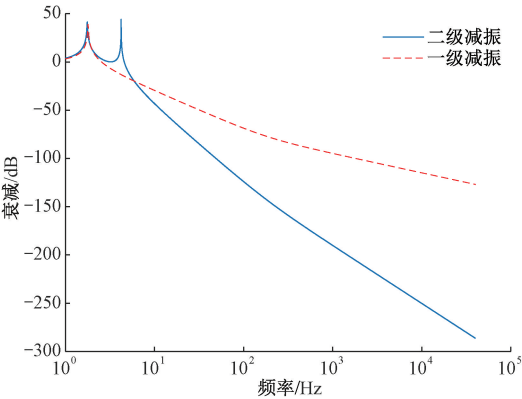


图5 隔振系统衰减量

Fig. 5 Vibration isolation system attenuation

图5中也给出了没有空气弹簧隔振基座, 只采用一级减振结构时的振动衰减曲线。通过对比, 可以看出当频率高于 6 Hz 后, 二级减振优于一级减振效果, 且频率越高差距越明显。

2.2 隔音

如图3所示, 测量等效噪声时, 水听器置于内金属罐中。为减少外部环境声响的干扰, 采取的主要隔音措施包括: 1) 双层厚壁金属罐体的隔音作用。外部环境中的声波在遇到罐体外壁时, 由于空气与金属声阻抗差异巨大, 大部分声波能量会在界面处被反射; 2) 真空腔对声波的隔绝作用。外金属罐顶盖留有排气孔, 在测量水听器等效噪声前, 利用真空泵, 通过装有阀门和真空表的排气管将罐内的空气抽出, 形成真空腔, 从而有效阻断外接环境噪声声波到水听器的传播路径。

2.3 电磁屏蔽

图3中的内、外金属罐均采用碳钢制成。碳钢同时具有较好的导电性和导磁性。电磁屏蔽效果通常用电磁

屏蔽效能 SE 进行评价。 SE 由吸收损耗 A 、电场反射损耗 R_e 、磁场反射损耗 R_m 、多次折射损耗 B 组成。

$$SE = A + R_e + R_m + B \quad (9)$$

$$A = 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (10)$$

$$R_e = 321.7 - 10\lg(f^3 r^2 \mu_r / \sigma_r) \quad (11)$$

$$R_m = 14.56 + 10\lg(fr^2 \sigma_r / \mu_r) \quad (12)$$

$$B = 20\lg(1 - e^{-2t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}}) \quad (13)$$

其中, t 为屏蔽材料厚度; f 为频率; μ_r 为相对磁导率; σ_r 为电导率, r 为场源与屏蔽体的距离。

若金属罐厚度为 9 mm , 所使用碳钢的电导率为 0.1 , 相对磁导率为 200 , 则当内外金属罐均处于封闭状态时, 根据式(9)~(13), 电磁屏蔽效能可达 168 dB@1 kHz 以上。由此可见, 双层金属罐体结构能够为内置的水听器和等效噪声测量电路提供良好的电磁屏蔽。

为取得预期的良好电磁屏蔽效果, 金属罐的罐盖与罐体间的接触电阻要保证足够小。

3 电路设计

第1章中已说明压电式水听器的噪声谱密度非常低。为确保测量的准确性, 水听器后级电路的等效输入噪声也需要足够低。图6给出了一种测量系统的电路构成。

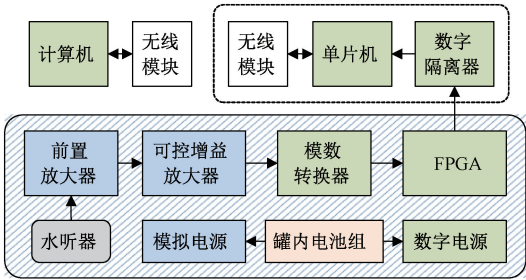


图6 电路构成

Fig. 6 Circuit composition

由于电路的总噪声系数主要由前置级决定^[17], 因此必须做好前置放大器的设计^[18]。图7给出了前置放大器的构成示意图。电路中采用了输入阻抗高、电流噪声小的仪表放大器。

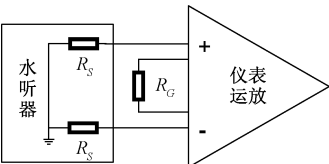


图7 前置放大器构成示意图

Fig. 7 Preamplifier configuration diagram

图 7 中前置放大器的等效输入噪声声压幅度谱密度 S_{NV} 可由式 (14) 计算获得^[19], 即:

$$S_{NV} = \sqrt{S_{NVR}^2 + S_{NVV}^2 + S_{NVI}^2} \quad (14)$$

其中, S_{NVR} 为前置放大电路的源阻抗噪声幅度谱密度, 其与水听器噪声幅度谱密度定义相同, 因此有 $S_{NVR} = S_{NH}$; S_{NVV} 为仪表运放的电压噪声幅度谱密度, 可由式 (15) 计算获得, 即:

$$S_{NVV} = \sqrt{(S_{NVout}/G)^2 + S_{NVin}^2 + S_{NVRG}^2} \quad (15)$$

其中, S_{NVout} 为运放固有输出电压噪声; G 为放大倍数; S_{NVin} 为运放固有输入电压噪声; S_{NVRG} 为仪表放大器增益设置电阻 RG 引起的热噪声^[20], 其值可利用式 (2) 计算。

S_{NVI} 为仪表运放的电流噪声幅度谱密度, 可由式 (16) 计算获得, 即:

$$S_{NVI} = \sqrt{2(S_{NI}|Z_h|)^2} \quad (16)$$

其中, S_{NI} 为运放固有输入电流噪声, $|Z_h|$ 表示水听器输出阻抗的模, $|Z_h| = Rs$; 信号为差分输入, 故引入常量 $\sqrt{2}$ 。

根据式 (14) ~ (16) 可知, 衡量电路前端总噪声大小的 S_{NV} 由 3 部分构成: 水听器参数 R_h 决定的 S_{NVR} ; 仪表运放参数 S_{NVout} 、 S_{NVin} 、 S_{NVRG} 、 G 共同决定的 S_{NVV} ; 仪表运放参数 S_{NI} 和水听器参数 Rs 共同决定的 S_{NVI} 。为最小化 S_{NV} , 在选择仪表运放时, 要根据待测水听器参数 Rs 的大小, 权衡运放参数对 S_{NV} 的最终影响。 Rs 又是频率的函数, 在低频段 Rs 值较大, S_{NI} 是影响的 S_{NV} 的主要参数, 随着频率的增长 Rs 值变小, S_{NVin} 可能取代 S_{NI} 成为影响 S_{NV} 的主要参数。

使用上文中提到的球形水听器, 分别连接前放 A (使用 $S_{NVin} = 3.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $S_{NI} = 0.2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 仪表放大器) 和前放 B (使用 $S_{NVin} = 1.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $S_{NI} = 1.0 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 仪表放大器), 计算不同前置放大器输出的等效噪声谱级, 结果如图 8 所示。

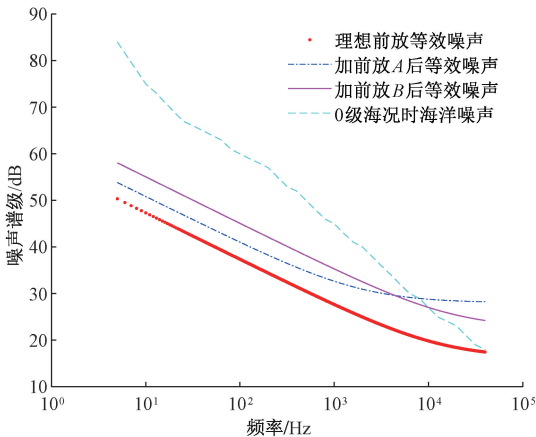


图 8 不同前放噪声谱级对比

Fig. 8 Different preamplifier noise spectrum level comparison

图 8 中理想前放的 S_{NVV} 和 S_{NVI} 均为 0, 由式 (14) 可知, 其等效输出噪声^[21]与图 2 中的水听器等效噪声相同。在低频段, 电流噪声影响大, 前放 A 等效输出噪声更低。当频率高于 4 kHz, 电压噪声的影响占据主导地位, 前放 B 的等效输出噪声更低。

水听器等效噪声谱级测量系统面向的待测水听器种类多样, 用户关注的频段也不同, 为保证测量的准确性, 必须准备多种指标参数的前置放大器, 以满足对不同待测水听器的匹配要求。

为保证测量结果准确性, 测量系统除了配备多型可选的前置放大器, 还可考虑采取抑制电路噪声的措施, 即:

1) 采用低噪声的蓄电池供电, 且将蓄电池组做密封处理后, 置于金属真空罐内, 模拟电路和数字电路分开供电; 注意模拟地、数字地、屏蔽地间的连接。

2) 采用 24 位高精度模数转换器, 且设置可变增益放大电路, 减小量化噪声。

3) 罐内电路与罐外电路间采用数字隔离器件, 且均独立供电。避免罐外数字电路对罐内电路的影响。

4) 使用无线数据传输方式, 且采用先采集存储, 再无线转发的数据获取模式。

4 数据处理方法

在第 1 章中给出了水听器等效噪声谱级的定义, 并利用水听器等效电阻热噪声计算公式获得了水听器等效噪声谱级。然而, 在实际测量时, 都需要在隔音、隔振、电磁屏蔽环境下, 利用如图 6 所示电路对水听器输出的电压信号 $s(t)$ 进行放大滤波和模数转换, 得到数字信号 $x(n)$, 再利用数字信号处理方法计算水听器等效噪声谱级。 $x(n)$ 与 $s(t)$ 的关系可以用式 (17) 表示, 即:

$$x(n) = 2^{L-1}K \times s(n/Fs)/V_r \quad (17)$$

其中, K 为电路放大倍数; Fs 为采样频率; L 和 V_r 分别为模数转换器的量化位宽和输入电压范围; $n = 0, 1, 2, \dots, N-1, N$ 为处理的样本点数。

根据式 (1), 水听器等效噪声谱级可由式 (18) 计算。

$$NL(f_k) = 20\lg(\sqrt{2}X(k)/\sqrt{\Delta f}) - ML(f_k) \quad (18)$$

其中, $X(k) = |FFT(x(n))|/N$ 为 $s(t)$ 幅度谱, $\Delta f = Fs/N$ 为频域分辨率, $f_k = k\Delta f, k = 0, 1, 2, \dots, (N-1)/2$ 。

式 (18) 也可以变换成式 (19) 的形式, 即:

$$NL(f_k) = 10\lg(2X^2(k)/\Delta f) - ML(f_k) \quad (19)$$

其中, $2X^2(k)/\Delta f$ 为信号 $s(t)$ 的功率谱密度 $PSD(f_k)$ 。因此为计算水听器等效噪声谱级, 可先求等效噪声的功率谱密度。

$s(t)$ 是随机噪声, 每个测量频率点上的 $NL(f_k)$ 为随

机变量,根据不同的观测样本计算出的估计值 $\widehat{NL(f_k)}$ 不同,因此单次计算获得的噪声谱密度级的波动会很大,估计结果不准确。水听器等效电阻热噪声、前置放大器电压噪声、电流噪声都是平稳的,水听器等效噪声是它们的和,也是平稳的。因此,可以利用平均周期图法计算 $s(t)$ 的功率谱密度,减小估计误差。具体步骤为:1)将长度为 M 的噪声信号分成 K 段,每段 N 点;2)对每段数据应用窗函数;3)计算每一段数据的功率谱密度;4)计算平均周期图;5)根据式(19)计算水听器等效噪声谱级。

5 实验测试

利用上述方法设计实现了一套专门用于水听器等效噪声谱级测量的系统,实物如图 9 所示。利用该测量系统,完成了以下实验测试。

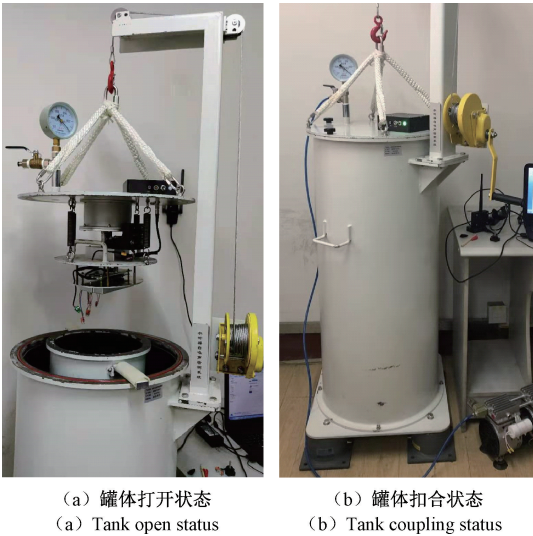


图 9 水听器等效噪声谱级测量系统
Fig. 9 Hydrophone equivalent noise spectrum level measurement system

5.1 屏蔽效果测试

采用比较法验证所构建屏蔽环境对声和电磁波的屏蔽效果。图 10 给出了所用测量设备的连接图。

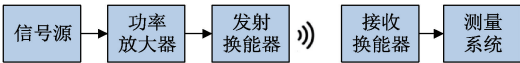


图 10 测量设备连接
Fig. 10 Measurement device connection

在测试声屏蔽效果时,发射换能器使用扬声器,接收换能器使用麦克风;在测试电磁屏蔽效果时,发射换能器和接收换能器均使用环形天线。

在发射换能器与接收换能器空间相对位置相同的情况下,分别记录引入屏蔽环境前后,测量系统接收到的测试信号幅度 H_1 和 H_2 ,再据此计算屏蔽环境带来的插入衰减 $\eta = 20\lg(H_1/H_2)$ 。衰减量 η 可作为衡量屏蔽效果的指标。表 1、2 给出了实测结果。

表 1 声屏蔽效果测量结果
Table 1 Sound shielding measurement results

频率/Hz	衰减/dB	频率/kHz	衰减/dB	频率/kHz	衰减/dB
50	71	800	85	6.4	85
100	75	1.6	86	12.8	85
300	76	3.2	83	16.0	87

表 2 电磁波屏蔽效果测量结果
Table 2 Electromagnetic shielding measurement results

频率/Hz	衰减/dB	频率/kHz	衰减/dB	频率/kHz	衰减/dB
50	62	800	71	6.4	66
100	65	1.6	73	12.8	72
300	68	3.2	74	25.0	75

表 1 给出的测量结果表明,在抽真空条件下,声屏蔽效果明显,在所测量的频带内,屏蔽措施带来的衰减量整体高于 70 dB。

表 2 给出的电磁屏蔽效果测量结果低于理论计算结果。此问题是电磁兼容工程中常见问题,原因在于理论模型无法完全反映现实世界的复杂性,例如无法完全避免缝隙泄漏、孔洞谐振、金属容器表面氧化、工频磁饱和等现象的发生。虽然低于理论值,但屏蔽带来的电磁衰减仍在整个测量频带内高于 60 dB,能够很好满足实际使用要求。

5.2 水听器实物测试

1) 不同平均次数

利用水听器等效噪声谱级测量系统,对一型自主研发的低噪声水听器进行了测量,并利用第 4 章中给出的数据处理方法求水听器等效噪声谱级。图 11 给出了对同一次采集记录的 60 s 水听器输出噪声信号,采用不同分段策略的处理结果。

图 11 中的计算结果表明,适当增加分段数,可以减小测量结果的波动,即减小估计方差,提高测量精度。但并不是分段数越多越好,当采集数据总量一定的情况下,过多的分段,也会降低等效噪声谱级的估计精度。对于不同测量频段,用户应根据具体测量要求,选择合适的总采集时长和分段数量,以平衡测量效率与测量精度。

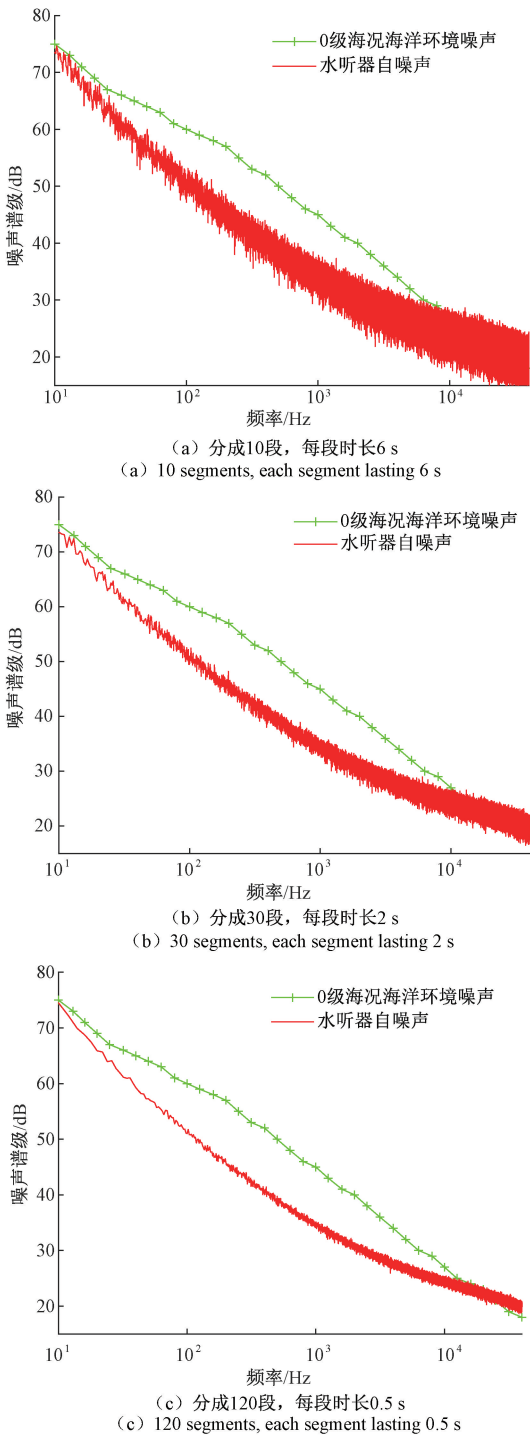


图 11 不同分段策略对应的测量结果

Fig. 11 Different segment strategies correspond to different calculation results

2) 不同工况状态

为考察测量系统的隔音、隔振以及电磁屏蔽效果,针对同一只水听器,在不同工况状态下,进行等效噪声谱级测量。依然使用以上水听器,总采样时长为 60 s,处理时分成 60 段,每段 1 s。

当内、外罐完全开放时,结果如图 12(a)所示,环境干扰噪声占据主导地位,无法完成正常的测量。低频干扰主要来自环境声响,高频干扰主要来自电磁辐射。当内、外罐盖紧,未抽真空时,结果如图 12(b)所示,由于内、外金属罐体对电磁辐射有很好的屏蔽效果,高频干扰已经消除,同时罐体兼具隔音作用,因此环境声响也在一定程度上被抑制。当内、外罐盖紧,且抽真空后,高低频干扰均被消除,结果如图 12(c)所示。

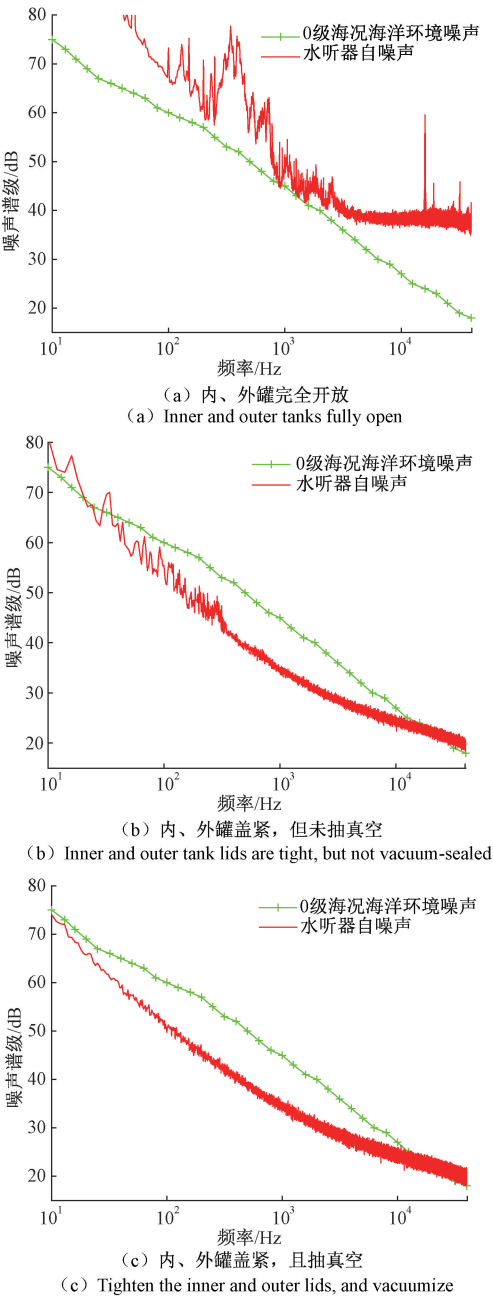


图 12 不同工况状态对应的测量结果

Fig. 12 Measurement results corresponding to different working conditions

以上不同工况下的测量结果表明,上文给出的隔音、隔振、电磁屏蔽措施有效。虽然采取了诸多措施,但在实际测量过程中,仍应尽量避免人员在系统周边的走动和大声喧哗,暂停周边高功率电力设备的工作。此外,建议选择多个时间段进行重复测量,观察多次测量结果的一致性,确认测量结果未受外部环境干扰。

3) 对 TC4014 的测量

为验证水听器等效噪声谱级测量系统设计的有效性,利用其对美国 RESON 公司生产的低噪声水听器 TC4014 进行了等效噪声谱级测量。测量结果如图 13 所示,系统实测获得的 TC4014 等效噪声谱级曲线与产品手册中提供的等效噪声谱级曲线基本吻合。以上测量结果表明:系统具备较高的测量精度,设计系统所采用的各种方法有效。

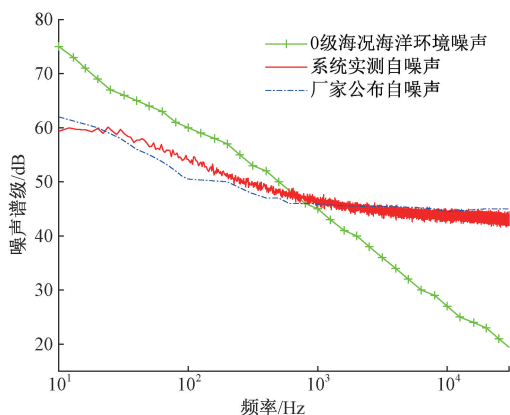


图 13 对 TC4014 的测量结果

Fig. 13 Measurement results of TC4014

6 结 论

本研究提出了一整套水听器等效噪声谱级测量系统设计实现方法,主要包括测量环境构建、电路设计和数据处理 3 部分内容。主要结论包括:

1) 为获得准确可信的等效噪声谱级测量结果必须做好隔音、减振和电磁屏蔽。双金属嵌套壳体结构是一种较好的选择,它不但同时加强了隔音和电磁屏蔽效果,而且也二级减振的实现提供了条件。

2) 需根据水听器自身参数和测量频段的不同合理选配放大电路。前置放大器必须置于很好的电磁屏蔽环境中。

3) 连续采集获得的数据样本长度要足够长,以保证在利用平均周期图法计算等效噪声谱级时,分段的数量和每段样本的数量都足够多。

参考文献

[1] NAKAMURA K. Ultrasonic transducers: Materials and design for sensors, actuators and medical applicat-

ions[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

[2] BOBBER R J. Underwater electroacoustic measurements[M]. California: Peninsula Publishing, 1988.

[3] 国家技术监督局. 声学标准水听器: GB T4128—1995[S/OL]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 6-7[1995-07-03].

State Bureau of Technical Supervision. Acoustics-Standard Hydrophone: GB/T 4128—1995 [S/OL]. Beijing: Standards Press of China, 1995: 6-7[2025-07-03].

[4] Underwater acoustics-hydrophones-properties of hydrophones in the frequency range 1 Hz to 500 kHz: IEC 60500:2017[S/OL]. [2017-04-01].

[5] 尹义龙, 李俊宝, 邢建新, 等. 弛豫铁电单晶弯曲梁矢量水听器研究[J]. 声学学报, 2014, 39(2): 243-250. YIN Y L, LI J B, XING J X, et al. Research on relaxor ferroelectric single crystal bending beam vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2014, 39(2): 243-250.

[6] 方尔正, 洪连进, 杨德森. MEMS 型水听器的自噪声分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 285-288. FANG ER ZH, HONG L J, YANG D S. Self-noise analysis of MEMS hydrophone [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3): 285-288.

[7] CHEN Y, ZHOU L SH, GUO X Y, et al. Modelling, measurement and optimization of self-noise of hydrophone with preamplifier[J]. Matec Web of Conferences, 2019, 283: 05004.

[8] 王文龙, 竺良龙, 尹航. 基于球形压电陶瓷的耐压水听器[J]. 应用声学, 2020, 39(2): 268-274.

WANG W L, DA L L, YIN H. Pressure-resistant hydrophone based on spherical piezoelectric cera-mics[J]. Applied Acoustics, 2020, 39(2): 268-274.

[9] 周利生, 许欣然. 聚(偏二氟乙烯-三氟乙烯)压电圆管水听器[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 1250-1259.

ZHOU L SH, XU X R. A piezoelectric P(VDF-TrFE) cylindrical hydrophone [J]. Acta Acustica, 2021, 46(6): 1250-1259.

[10] GABRIELSON J B. Modeling and measuring self - noise in velocity and acceleration sensors[C]. AIP Conference Proceedings, 1996, 368(1): 1-48.

[11] 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量[M]. 兵器工业出版社, 2017.

CHEN Y, ZHAO H, YUAN W J. Measurement of

- underwater electro-acoustic parameters [M]. Ordnance Industry Press, 2017.
- [12] LI ZH, CHEN H J. Method for measuring self-noise of vector hydrophones[J]. Journal of Marine Science and Application, 2017, 16(3): 370-374.
- [13] ZAITSEV D L, AVDYUKHINA S Y, RYZHKOV M A, et al. Frequency response and self-noise of the MET hydrophone[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7(2): 443-452.
- [14] KRISHNAKUMAR R, RAMESH R. A method and an experimental setup for measuring the self-noise of piezoelectric hydrophones [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(2): 413-421.
- [15] YANG D F, YANG L, CHEN X Y, et al. A piezoelectric AIN MEMS hydrophone with high sensitivity and low noise density [J]. Sensors and Actuators A, physical, 2021, 318: 112493.
- [16] 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 ZH, YANG SH E. Research progress and challenges of underwater acoustic vector sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 1-19.
- [17] SABZI M, KAMAREI M, RAZBAN T, et al. Optimization of LNA's first stage to reduce overall noise figure in multi-stage LNAs[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020, 123: 153300.
- [18] 王言章, 石佳晴, 时洪宇. 航空 ZTEM 磁传感器调理电路低噪声优化设计[J]. 仪器仪表学报. 2018, 39(9): 187-194.
- WANG Y ZH, SHI J Q, SHI H Y. Low-noise optimized design of conditioning circuit for aerial ZTEM magnetic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 187-194.
- [19] SPINELLI E M, HABERMAN M A. An ultralow-noise fully differential amplifier [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2024(73): 3485398.
- [20] SUNDERLAND A, JU L, STEELE E, et al. Differential amplifier for inductive sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(2): 2456-2461.
- [21] 李建翔, 李醒飞, 刘帆. 磁流体动力学角振动传感器噪声等效指标优化分析[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7): 115-125.
- LI J X, LI X F, LIU F. Optimization analysis of noise equivalent metric for magnetohydrodynamic angular vibration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 115-125.

作者简介



王大成(通信作者), 分别在 2000 年、2003 年、2007 年于哈尔滨工程大学获得学士学位、硕士学位、博士学位, 现为哈尔滨工程大学副教授, 主要研究方向为水声换能器电声参数测量、声纳系统设计。

E-mail: greenleaf100@163.com

Wang Dacheng (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Harbin Engineering University in 2000, 2003, and 2007, respectively. He is currently an associate professor at Harbin Engineering University. His main research interests include electroacoustic parameter measurement of hydroacoustic transducers and sonar system design.



王有国, 2016 年于昆明理工大学获得学士学位, 2022 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为上海宇航系统工程研究所工程师, 主要研究方向为运载火箭电气系统设计。

E-mail: 1107951868@qq.com

Wang Youguo received his B. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2016 and his M. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2022. He is currently an engineer in the Shanghai Aerospace System Engineering Research Institute. His main research interest is electrical system design for launch vehicles.