

引用格式: 张凯, 王月兵, 赵鹏, 等. 激光法水听器灵敏度计量校准系统研究[J]. 声学技术, 2024, 43(4): 593-600. [ZHANG Kai, WANG Yuebing, ZHAO Peng, et al. Research on sensitivity measurement and calibration system of laser hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(4): 593-600.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.04.019

激光法水听器灵敏度计量校准系统研究

张凯, 王月兵, 赵鹏, 解建宇

(中国计量大学计量测试工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 为满足水听器灵敏度校准的需要, 开展了对激光法水听器灵敏度校准系统的研究。根据激光法水听器灵敏度测量的基本原理, 综合分析国内外相关研究, 最终采用反光透声条带的激光法水听器灵敏度校准方法进行测量系统设计, 以消除传统薄膜法存在的夹持方式与夹具对声场造成的影响; 为解决反光透声条带在测量频段的谐振造成相应频点测量误差过大的问题, 对反光透声条带的振动模式进行了仿真, 并对仿真模型进行了实验验证。仿真结果与条带频率响应测量结果基本一致, 实现了条带谐振频点的准确预测, 证明该模型对于条带选型具有指导作用。文章研制了激光法水听器灵敏度计量校准系统, 并开展了校准实验。文中的实验结果与三换能器互易法的校准结果之间的误差不超过 1 dB, 证明该测试系统具备水听器灵敏度校准的能力, 具有较高的军事和民用价值。

关键词: 水听器; 灵敏度; 校准; 激光测振技术

中图分类号: TB56

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2024)-04-0593-08

Research on sensitivity measurement and calibration system of laser hydrophone

ZHANG Kai, WANG Yuebing, ZHAO Peng, XIE Jianyu

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: To meet the needs of hydrophone sensitivity calibration, the hydrophone sensitivity calibration system using laser method is studied. According to the basic principle of the laser method based hydrophone sensitivity measurements and the comprehensive analysis of relevant research works at home and abroad, the laser method using the reflective and transparent strip is finally adopted to design the measurement system for eliminating the influence of clamping way and clamps on the sound field in the traditional thin-film method. In order to study the problem that the resonance of the reflective and transparent strip in the measurement frequency band causes the big measurement error at the corresponding frequencies, the vibration mode of the reflective and transparent strip is simulated, and the simulation model is verified by experiments. The simulation results are basically consistent with the measurement results of frequency responses of the strip, and the accurate prediction of the resonance frequencies of strip is realized. Thus, it is confirmed that the model has a guiding role for strip selection. The hydrophone sensitivity measurement and calibration system using laser method is developed, and calibration experiments are carried out. The error between the experimental results and the calibration results of the three-transducer reciprocity method is less than 1 dB, which proves that the test system has the capability of hydrophone sensitivity calibration and has high military and civilian values.

Key words: hydrophone; sensitivity; calibration; laser vibration measurement technology

0 引言

21 世纪是海洋的世纪, 海洋在军事、经济上具

有重要价值, 对于海洋的探索正在受到越来越多的关注。各种水声测量仪器则是海洋开发不可或缺的设备, 其中水听器是水声测量技术研究中最重要设备之一, 广泛应用于水声研究和海洋探测等领域。只有对水听器的自由场开路电压灵敏度进行定期校准并溯源至特定基准, 才能够准确获取水声信息^[1]。

水听器灵敏度校准方法一般分为一级校准方法和二级校准方法。二级校准方法中由于使用了标准水听器, 增加了测量结果的误差。一级校准方法中

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-11-13

基金项目: 国防军工计量“十三五”科研计划项目(JSJL2018207 B007)。

作者简介: 张凯(1998—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为水声计量测试技术。

通信作者: 王月兵, E-mail: wyb_1963@163.com

国家标准推荐的方法有自由场互易法、激光测振法等^[2]，常用于 1 kHz 以上频段的水听器校准，测量精度相对较高^[3]。

在 2 kHz 以上频段水听器灵敏度测量中，一般首选自由场互易法。互易法水听器灵敏度测量基于电声互易原理，受到换能器互易性影响较大，且需要进行三组换能器的安装，测量过程繁琐^[4]，且互易法测得的声压并不是该水介质质点的实际声压，而是该区域声压平均效应的结果。与自由场互易法相比，激光法避免了上述互易法的问题。激光作为一种非侵入式测量方法，不会对声场造成干扰，且定位精度高^[5-6]；激光法摆脱了实物标准，可溯源至物理常数，大幅度提高了测量准确度、有利于量值传递的扁平化，符合量子化计量的发展趋势^[7]。

早在 20 世纪 80 年代，光学方法就开始用于水听器灵敏度的校准。英国国家物理实验室、德国联邦物理技术研究院、中国计量科学研究院、杭州应用声学研究所相继建立了激光法水听器灵敏度校准装置^[8-11]。

采用激光法进行水听器灵敏度校准时，激光束入射到反光薄膜上对其振速进行测量，经过计算得到声压值，再将水听器放置到相同位置，测量其开路电压即可测得水听器灵敏度。采用这样的测量系统，薄膜尺寸大且轻薄，对夹持要求较高，大尺寸的夹具对声场的影响较大，复杂的夹持方式不确定因素较多，且设计制造困难^[12]。

本文在对现状分析的基础上，以工程实用性为主，设计了一套使用反光透声条带进行激光法水听器灵敏度校准的测试系统，以优化原有的激光法水听器灵敏度校准系统。

1 基本原理

根据波动声学理论与实验结果，平面波条件下，水介质的质点振速 u 与声压 p 之间的关系为

$$p = \rho c u \quad (1)$$

式中： ρ 为水介质的密度； c 为水中的声速。因此只需在该条件下测得水介质质点振速，便可计算得到该点声压值。

采用激光法对水听器灵敏度进行校准时，是通过激光测振仪测量反光透声条带的质点振速，间接测量声场中水介质的质点振速。在声波的作用下，当反光透声条带的厚度远小于声波波长，条带将会跟随周围水介质进行同振速的运动，此时条带实际振速与水介质的振速相同。因此测量条带的振速，便可间接测得该质点处水介质的振速。由于激光射

入声场中，不可避免地受到声波调制作用的影响。该效应被称为声光干涉。此时激光干涉仪测得的振速 v 并不等于条带实际振速 u ，两者之间可通过水介质的等效折射系数进行换算：

$$n^* = n_0 - n_1 \frac{(kl_0)^2}{kl_0 - j} e^{jkl_0} \left(\frac{e^{-jkl_1}}{kl_1} + j \int_{l_0}^{l_1} \frac{e^{-jklx}}{x} dx \right) \quad (2)$$

式中： $n_0=1.33$ ，为水介质的折射系数； $n_1=0.32$ ，为水介质的光弹系数； l_0 为激光入射位置到条带的距离； l_1 为激光入射位置到声源的距离； k 为波数。

激光法水听器灵敏度校准布置图如图 1 所示。此时 $l_0=0.4$ m， $l_1=1.25$ m，等效折射系数 n^* 随频率 f 的变化如图 2 所示。

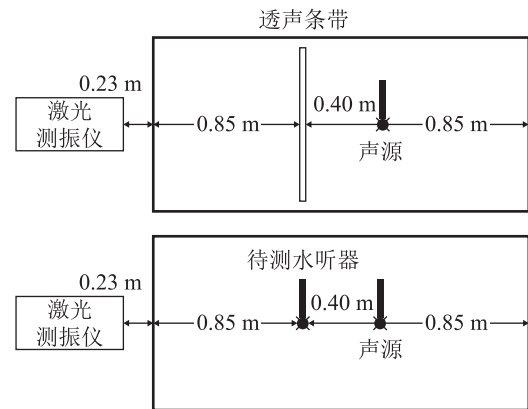


图 1 激光法水听器灵敏度校准布置图

Fig.1 Layout diagrams of hydrophone sensitivity calibration using laser method

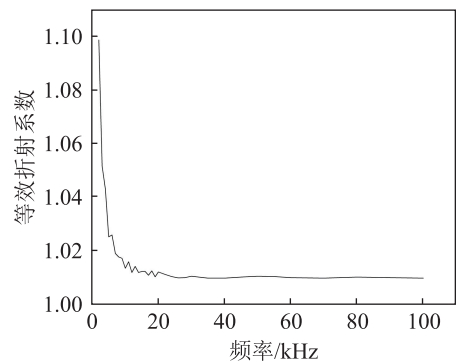


图 2 等效折射系数随频率的变化曲线

Fig.2 Variation curve of effective refractive index with frequency

条带表面振速 u 与激光测振仪测得振速 v 之间的关系可表示为

$$v = 2n^* \cdot u \quad (3)$$

在水介质质点声压测量结束后，移开条带，将待校准水听器放置于条带所在位置，使水听器声中心与已测水介质质点位置重合，在同样条件下测得水听器两端开路电压 U_{∞} 。待校水听器的接收灵敏度为

$$M = \frac{U_{oc}}{p} = \frac{U_{oc} \cdot 2n^*}{\rho cv} \quad (4)$$

式中： M 为水听器灵敏度； U_{oc} 为水听器两端开路电压。

2 测试系统方案

激光法水听器灵敏度校准系统通常采用薄膜反射法或者水面反射法两种测量方式，以此为基础结合实际环境和需求进行实际方案设计。薄膜反射法为了提高测量频率范围，薄膜厚度需要远小于声波波长；为了降低反射，通常采用较大面积的薄膜，薄膜通常大而轻薄，因此该方法对于薄膜夹持要求较高。为保证薄膜的平整，需要一个专用的测量支架，引入大型测量支架会对声场造成影响。水面反射法避免了激光受到声光调制作用的影响，但是水面法更容易受到环境因素的干扰，实际操作较为困难。

考虑到操作的便捷性、校准的可靠性和系统的通用性，结合实际需求，本文设计了一套基于激光测振法的水听器灵敏度校准系统，如图3、4所示。综合目前研究成果和实验室需求，该系统主要对2~20 kHz频段水听器灵敏度进行校准。该系统使用

反光透声条带作为振速测量介质，反光透声条带选用表面镀银的聚苯乙烯塑料，表面涂有反光材料；条带通过钳口夹具安装在行走机构上并通过重锤绷直，保证条带平整地固定在测量声场中。由于选用的条带较厚，在较低频段可能存在谐振频点，谐振频点的存在会使灵敏度测量产生较大误差，因此在测量时要避开谐振频点。为提高信噪比，系统选用带有隔振功能的玻璃消声水槽，激光测振仪位于光学平台上，水槽行走机构和光学平台的组合可对激光、条带、水听器和声源的精确运动进行定位。为实现自动化测量，本系统采用LabVIEW上位机软件控制信号源和示波器对声源、水听器、激光测振仪进行信号的采集和发射，并实时进行信号处理、校准计算和结果输出。

校准时，首先通过激光测振仪测量条带的振速，计算出该位置水介质质点声压。然后移走条带，将待校水听器放置到该质点位置，使得水听器声中心与该点重合，保持系统发射状态不变，使用相同的信号处理方法对来自水听器的输出信号进行采集处理，得到水听器的开路电压幅值。最后根据测量得到的水介质质点声压与水听器的输出电压，计算出待校水听器的灵敏度。

3 条带声学特征

目前国内外激光法水听器灵敏度计量校准装置采用的反光透声介质大多为微米量级厚度的薄膜。本系统采用了毫米量级的条带作为反光透声介质。与薄膜相比，条带的声学性质发生了较大变化。首先谐振频率发生了较大改变，由于条带在2~20 kHz频带存在较多谐振点，会导致条带不能完全反映水介质质点振速；此外，声波作用在条带上会发生反射，作为次级声源向外辐射声能。为了能够准确获取水介质质点振速，需要选择合适的测量条件、条带形状、材料和夹持方式，以规避以上因素的影响。

3.1 透声性能计算

反光透声条带会给声场带来插入损失。在对条带透射性能进行分析时，可视在无限均匀的水介质中插入无限长的条带，且声波垂直入射条带。

假设将厚度为 D 、特性阻抗为 R_2 的中间层媒质置于特性阻抗为 R_1 的无限媒质中，当平面声波垂直入射到中间层界面上时，一部分发生反射回到无限媒质中，形成了反射波，另一部分透射到中间层；当声波行进到中间层的另一界面上时，特性阻抗再

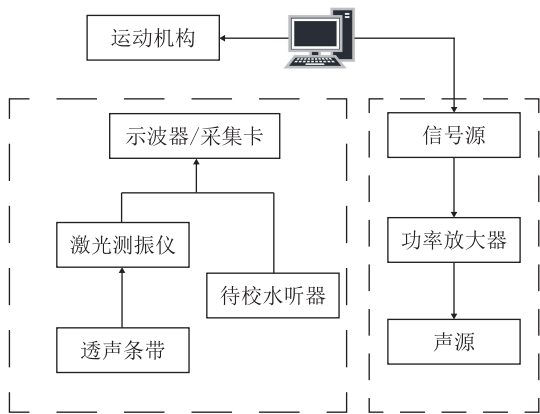


图3 激光法水听器灵敏度校准系统框图
Fig.3 Block diagram of the hydrophone sensitivity calibration system using laser method

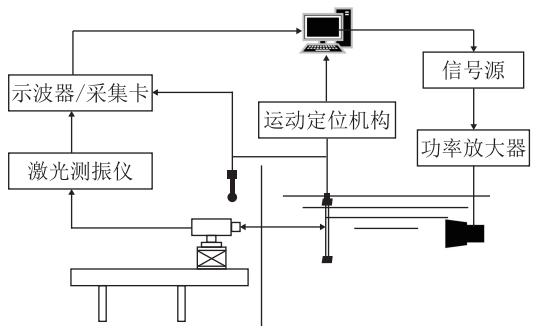


图4 校准系统结构图
Fig.4 Structure diagram of calibration system

一次改变,一部分又会反射回中间层,其余部分会透射到无限媒质。

条带的声压透射系数为透过中间层之后的声压与中间层入射声压之比^[13],等效透射系数 t_p 的计算公式为

$$t_p = \left| \frac{p_t}{p_i} \right| = \frac{2}{[4 \cos^2 k_2 D + (R_{12} + R_{21})^2 \sin^2 k_2 D]^{1/2}} \quad (5)$$

式中: p_t 和 p_i 分别为透过中间层之后的声压与中间层入射声压; k_2 为波数; $R_{12} = \frac{R_2}{R_1}$; $R_{21} = \frac{R_1}{R_2}$ 。

本装置采用聚苯乙烯材料,其特性阻抗 $R_2 = 2.45 \times 10^6 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,当条带的厚度为1.6 mm时,声压透射系数如图5所示。在2~20 kHz频段,该条带可以认为对声波是完全透射的。

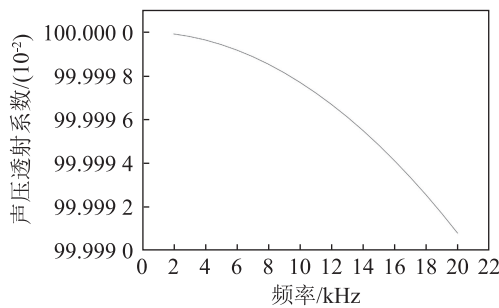


图5 反光透声条带声压透射系数

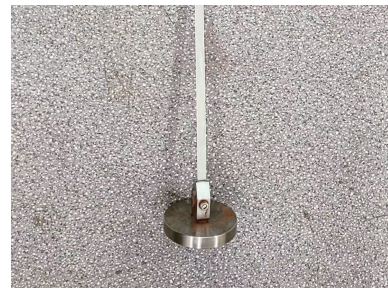
Fig.5 Acoustic transmission coefficient of the reflective and transparent strip

3.2 谐振频率仿真

为获得反光透声条带的谐振频率及其他声学特征,建立了三维声-结构耦合模型进行频域仿真。仿真条带情况如图6所示,其两端由钳口夹固定,下端钳口夹进行重锤配重将条带绷直,条带浸没在水介质中,平面声波垂直入射到条带表面。辐射声波的频率在2~20 kHz范围内扫描,步长为50 Hz。声压的测量点设置在条带的中心位置。使用长1200 mm、宽10 mm、厚度分别为0.37、0.63、1.60 mm的聚苯乙烯塑料条带仿真得到的频率响应曲线如图7所示。通过对图7(a)、7(b)、7(c)的仿真



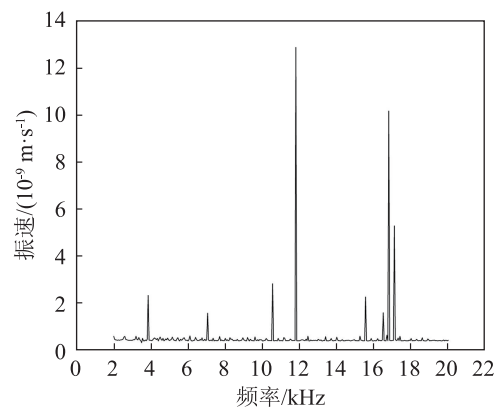
(a) 反光透声条带上端



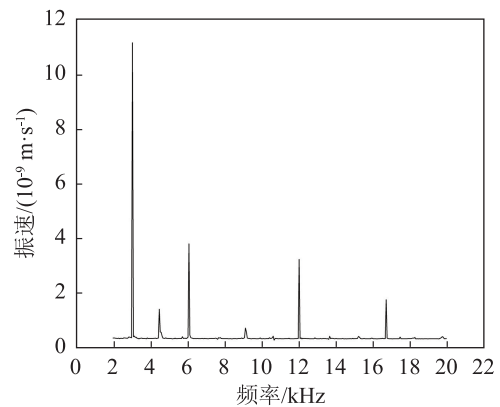
(b) 反光透声条带下端

图6 反光透声条带的照片示意图

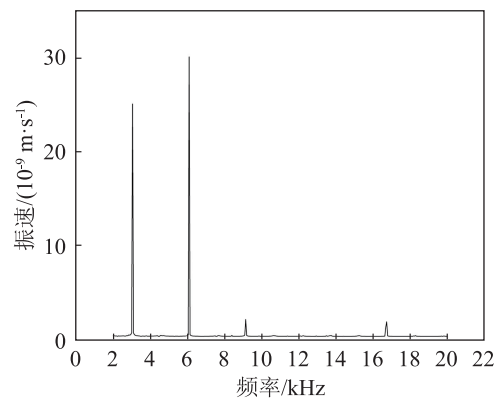
Fig.6 Photos of the reflective and transparent strip



(a) 0.37 mm厚度条带的频率响应



(b) 0.63 mm厚度条带的频率响应



(c) 1.60 mm厚度条带的频率响应

图7 不同厚度条带结构振动的频率响应

Fig.7 Frequency responses of structural vibration of the strips with different thicknesses

结果比较可见，使用1.60 mm厚的条带时，谐振频率相对较少。实验结果也表明，除谐振频率区域外，在其他频率上由于寄生振动引起的误差小于0.4 dB。不同厚度条带的谐振频率仿真结果如表1所示。

表1 不同厚度条带的谐振频率仿真结果
Table 1 Simulation results of resonant frequencies of the strips with different thicknesses

条带厚度/mm	谐振频率/Hz			
	一阶	二阶	三阶	四阶
0.37	3 850	7 050	10 550	11 800
0.63	3 050	4 500	6 150	12 050
1.60	3 050	6 100	9 150	16 750

3.3 条带受迫振动频率响应

校准系统实物如图8所示。校准系统在一个大小为2.1 m×1.2 m×1.2 m的玻璃水箱中进行工作。计算机控制信号源型号为DG4000，ADC分辨率为14位、最大采样率为4 MHz，产生10个周期的正弦脉冲激励信号，由功率放大器(LSP-100)放大后发送到声源(LY-20小球水听器，工作频率范围为2~50 kHz，谐振频率为45 kHz，品质因数为2.6)。当频率为17 kHz时，脉冲长度为882 mm。利用式(4)进行灵敏度计算。计算机通过示波器(型号为DG2000，最大采样率为2 GHz)记录激光测振仪及水听器的输出信号，并计算出不同激励频率的接收信号的振幅。将激光反射位置与水听器位置重合，两者与声源位于同一高度，间距为0.4 m。水听器型号为6号小球水听器(灵敏度为-196.7 dB·V·μPa⁻¹，工作频率范围为280 kHz)。频率响应试验在5~20 kHz的频率范围内进行。

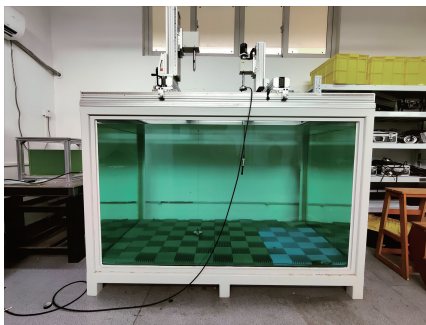


图8 校准系统实物
Fig.8 Picture of calibration system

分别对不同厚度条带的频率响应曲线进行了实验测试。由于声源的频率响应不均匀，将频率响应进行了归一化处理，即将条带的频率响应除以该水介质质点的水听器频率响应。厚度为0.37、0.63、1.60 mm条带的频率响应的实验结果和仿真结果如图9所示。

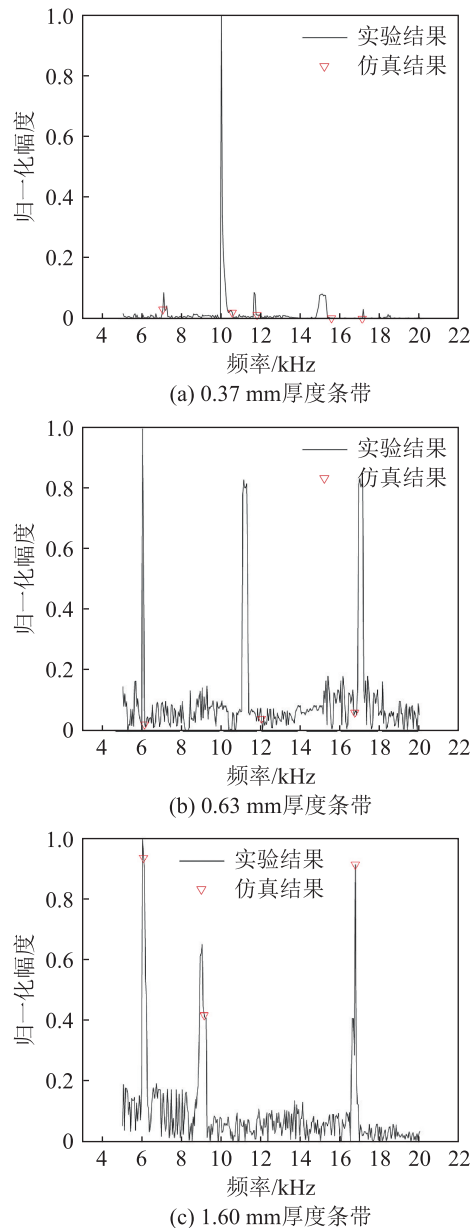


图9 不同厚度条带的频率响应曲线的实验结果与仿真结果对比
Fig.9 Comparison of the tested and simulated frequency response curves of the strips with different thicknesses

频率响应实验与仿真计算得到的谐振频率对比如表2所示，仿真谐振频率与测试谐振频率的误差在8%以内。实际测量频率响应时，存在外界干扰

表2 不同条带厚度受迫振动谐振频点的实验与仿真结果对比
Table 2 Comparison of experimental and simulation results of the resonant frequencies of forced vibration of the strips with different thicknesses

谐振频率阶数	不同条带厚度时 谐振频率/Hz			不同条带厚度时 谐振频率误差/%		
	0.37 mm	0.63 mm	1.60 mm	0.37 mm	0.63 mm	1.60 mm
一阶	7 100	6 050	6 050	0.7	1.6	0.8
二阶	10 000	11 150	9 000	5.2	7.5	1.6
三阶	11 650	17 000	16 750	1.3	1.5	0

较多,非谐振频率区域响应归一化幅度集中在0.05~0.1之间;谐振频率区域响应远超过非谐振频率区域的40%,除谐振频率区域(谐振频率 ± 200 Hz)外,其他位置由于条带引入的误差在0.4 dB之内。

以1.6 mm厚的条带的频率响应为例,对比该条带受迫振动实验谐振频率区域激光测振仪测得的振速信号(左侧)和水听器输出的开路电压(右侧)(图10(a)、图10(b)、图10(c))与非谐振频率区域振速信号

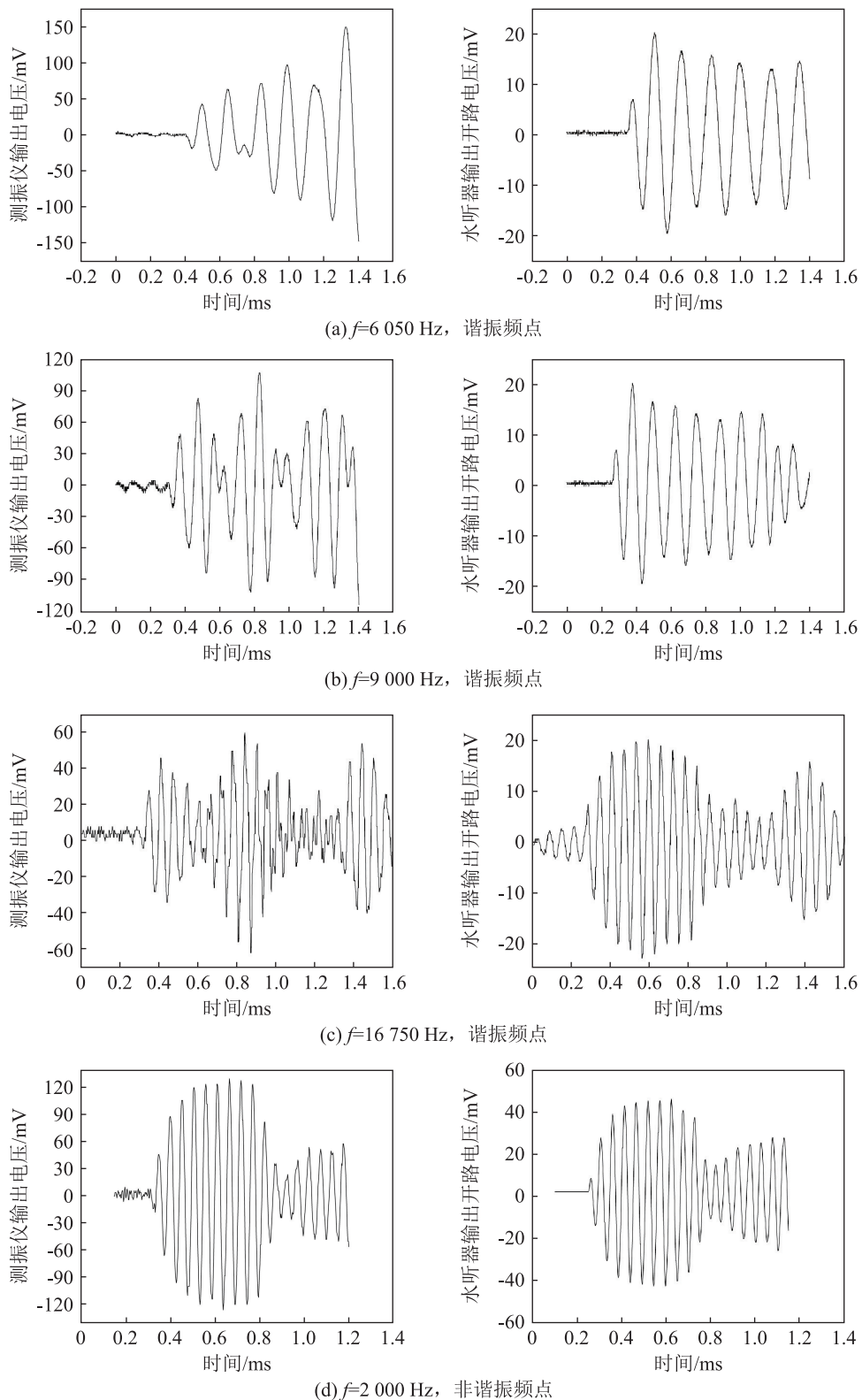


图10 谐在谐振与非谐振频率区域的振动速度信号(左)与水听器开路电压信号(右)

Fig.10 The vibration velocity signals (left) and the open-circuit voltage signals (right) of hydrophone in the resonant and non-resonant frequency regions

(左侧)和水听器信号(右侧)(图10(d))可知:在非谐振频率区域时,水听器开路电压信号与振速信号波形一致性较高;在谐振频率区域时,两者较大差异,此时振速信号发生了畸变,不能真实反映水介质质点振速。频率响应实验结果验证了仿真模型对于谐振频率区域预测的准确性,同时验证了谐振频率区域振形出现了畸变。由此基本可以认为仿真计算是准确的,该仿真模型可对条带的谐振频率区域进行分析,为条带选型提供理论依据。

4 校准实验

使用本文中的系统对BK8104水听器、自制6号小球水听器进行接收灵敏度校准,为验证结果准确性,使用三换能器互易法对同样的水听器进行了校准,结果如图11所示。图11中的结果表明,在2~20 kHz的频率范围内,除谐振频率区域外,BK8104水听器、自制6号小球水听器校准结果与互易法校准结果之间的最大偏差不过1 dB。

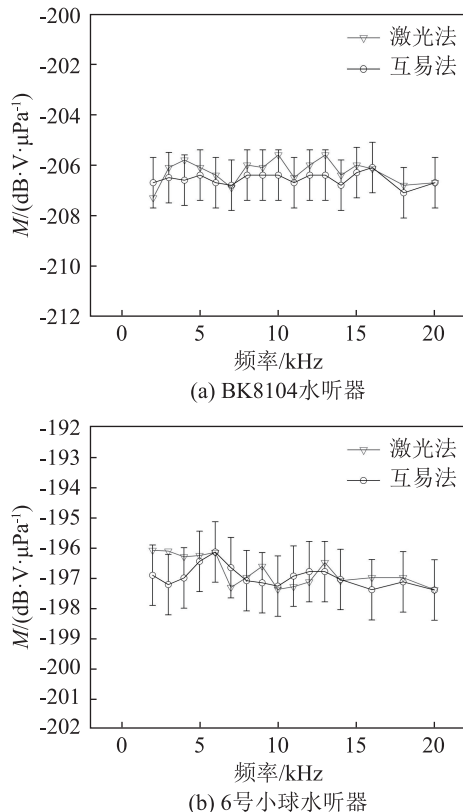


图11 水听器接收灵敏度的激光法与互易法校准结果对比
Fig.11 Comparison of hydrophone receiving sensitivities calibrated by the laser method and the reciprocity method

5 测量不确定度分析

根据国家技术规范进行测量不确定度评定,包

含A类评定与B类评定。与测量重复性相关的采用A类评定,其他采用B类评定,后者主要与系统误差相关。

(1) A类不确定度

对使用该系统进行灵敏度校准时,分别在各频点进行多次重复测量,可以得到由随机误差引起的A类不确定度为0.2 dB。

(2) B类不确定度评定

① 反光透声条带的结构振动会引起激光测振仪的信号失真,当测量点避开条带的谐振频率时,由结构振动引起的标准不确定度不超过0.4 dB。

② 采集系统主要包括示波器和激光测振仪,由这些仪器的噪声、非线性和分辨率等因素所带来的标准不确定度不超过0.1 dB。

③ 测量环境引入的不确定度主要包括外界干扰,该项标准不确定度不超过0.1 dB。

④ 本方法对声场采用平面波近似,由偏离平面波声场引入的标准不确定度不超过0.03 dB^[15]。

⑤ 系统的信号处理包括激光测振仪硬件滤波和上位机软件滤波,由此引入的标准不确定度小于0.1 dB。

⑥ 本系统采用行走机构对水听器和反光透声条带进行定位,其位置分辨率为5 mm,由此引入的标准不确定度小于0.1 dB。

⑦ 由于膜片透射系数引起的测量误差在当前频段极小,可以忽略不计。

依据不确定度合成方法,不确定度B类评定的合成不确定度为0.44 dB。由A类和B类不确定度可得,该系统的合成标准不确定度为0.48 dB,拓展不确定度(不确定度包含因子 $k=2$)为1.0 dB。

6 结论

本文使用反光透声条带进行激光法水听器灵敏度校准,通过测量反光透声条带对水介质质点振速进行测量,通过波动声学理论计算得到声压,用于水听器灵敏度校准,可以得到准确的水听器接收灵敏度。与常规的薄膜激光法水听器灵敏度校准相比,本文方法由于使用反光透声条带,夹持结构简单对声场影响较小。使用Comsol仿真软件建立的模型可对条带的振动模态进行分析,准确得到了谐振频点,实验结果可为条带选型和误差分析提供指导。

参 考 文 献

- [1] 段炼. 3-315 Hz矢量水听器低频校准装置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

- [2] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学水听器: GB/T 4130—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 刘晋昌, 刘明波, 王双记. 振动液柱法校准低频水听器的研究与实现[C]//第二十三届全国振动与噪声控制学术会议论文集. 沈阳, 2010: 579-585.
- [4] 陶智. 矢量水听器在有限空间内的测试条件分析与试验研究[J]. 船舶标准化工程师, 2020, 53(3): 99-103.
TAO Zhi. Analysis and experimental study on testing conditions of vector hydrophones in limited space[J]. Ship Standardization Engineer, 2020, 53(3): 99-103.
- [5] 王世全, 王月兵. 激光干涉法在超声换能器近场全息测量中的应用[J]. 声学及电子工程, 2011(1): 32-35.
WANG Shiquan, WANG Yuebing. Application of laser interferometry in near-field holographic measurement of ultrasonic transducer[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2011(1): 32-35.
- [6] 王月兵, 王世全. 激光反射全息技术在超声换能器近场测量中的应用[J]. 声学学报, 2012, 37(1): 68-73.
WANG Yuebing, WANG Shiquan. The application of laser reflective tomography in near-field measurements of ultrasonic transducers[J]. Acta Acustica, 2012, 37(1): 68-73.
- [7] 王敏, 杨平, 何龙标, 等. 10~500 kHz 水听器的激光外差干涉法原级校准[J]. 声学学报, 2021, 46(4): 614-622.
WANG Min, YANG Ping, HE Longbiao, et al. Primary calibration of hydrophones in the frequency range 10 to 500 kHz using a heterodyne interferometer[J]. Acta Acustica, 2021, 46(4): 614-622.
- [8] THEOBALD P D, ROBINSON S P, THOMPSON A D, et al. Technique for the calibration of hydrophones in the frequency range 10 to 600 kHz using a heterodyne interferometer and an acoustically compliant membrane[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(5): 3110-3116.
- [9] 王月兵, 黄勇军. 使用激光测振技术校准水听器灵敏度[J]. 声学学报, 2001, 26(1): 29-33.
WANG Yuebing, HAUNG Yongjun. Calibration of hydrophones using optical technique[J]. Acta Acustica, 2001, 26(1): 29-33.
- [10] 王世全. 100 kHz~1 MHz 频率范围水听器灵敏度激光法校准及其验证[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(3): 58-62.
WANG Shiquan. Verification of hydrophone calibration using optical method and reciprocal method in the frequency range 100 kHz to 1 MHz[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2019, 39(3): 58-62.
- [11] 王世全, 黄勇军, 陈毅. 1 kHz~200 kHz 水听器灵敏度光学方法校准[C]//2015'中国西部声学学术交流会议论文集. 雅安, 2015: 89-92.
- [12] 邢广振. 激光外差校准高频水听器及若干影响因素的研究[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2013.
- [13] 杜功焕, 朱哲民. 声学基础[M]. 2版. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [14] 贾梦雯, 赵鹏, 王月兵. 高静水压下换能器阻抗特性的测量方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(4): 461-468.
JIA Mengwen, ZHAO Peng, WANG Yuebing. Research on measurement method of electrical impedance of transducer under high hydrostatic pressure[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(4): 461-468.
- [15] STOCK M, DAVIS R, DE MIRANDÉS E, et al. The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology[J]. Metrologia, 2019, 56(2): 022001.