矢量水听器低频绝对校准装置研究

成 浩[1]，陈洪娟[2]，李佳桐[3]
(1. 海军研究院，上海 200235；2. 哈尔滨工程大学水声工程学院，黑龙江哈尔滨 150001；3. 中国电子科技集团第 32 研究所，上海 201808)

摘要： 提出了矢量水听器低频绝对校准装置。首先给出了矢量水听器绝对校准的原理，通过测量声源辐射面的加速度，利用驻波管中平面驻波声场中的声压、质点振速和质点加速度在垂直方向上的分布规律，得出了校准计算公式；之后对校准装置中平面驻波场在垂直方向上的分布规律进行了测量验证，并对测量用加速度计进行了校准；最后对待校矢量水听器的灵敏度和指向性进行了测试。结果表明：在 10～315 Hz 频带内，矢量水听器低频绝对校准装置在±1 dB 误差允许范围内，可用于矢量水听器的绝对校准。

关键词： 矢量水听器；低频校准；绝对校准
中图分类号： TB566　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-3630(2018)-03-0292-05
DOI 编码： 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.018

Research on low frequency absolute calibration apparatus of acoustic vector hydrophone

CHENG Hao[1], CHEN Hong-juan[2], LI Jia-tong[3]
(1. *Navy Institution of Standard and Specification*, *Shanghai* 200235, *China;*
2. *Underwater Acoustic Engineering College*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *Heilongjiang*, *China*;
3. *China Electronic Technology Group Corporation thirty-second Research Institute*, *Shanghai* 201808, *China*)

Abstract: Low frequency absolute calibration apparatus of acoustic vector hydrophone is studied and proposed. The theory of acoustic vector hydrophone absolute calibration is introduced. By measuring the acceleration of radiation surface on the bottom of the tube and using the distribution patterns of pressure and particle in the vertical direction in plane standing wave sound field, the calibration formula is obtained. The radiation surface of the calibration apparatus is improved, and the accelerometer for measuring radiation surface is calibrated. Finally, both the sensitivity and directivity of an acoustic vector hydrophone are tested by the absolute calibration apparatus. The results show that in the allowable error range of ±1 dB, the absolute calibration apparatus can be used for absolute calibration of acoustic vector hydrophone within the 10～315 Hz frequency range.

Key words: acoustic vector hydrophone; low frequency calibration; absolute calibration

0　引 言

随着矢量水听器在工程中的广泛应用，使得人们对矢量水听器性能的评价越来越关注，对矢量水听器的灵敏度和指向性进行校准可以准确地了解矢量水听器性能的优劣。目前对矢量水听器进行校准一般采用振动液柱法[1]或驻波管比较校准法[2-4]，工作频带一般在 20 Hz 以上，但对于频率范围为 10～20 Hz 的甚低频段开展矢量水听器的绝对校准装置研究较少，本文在驻波管校准装置的基础上，利用驻波声场的特性，通过理论研究和实践操作，在10～315 Hz 频率范围内，建立了可以对矢量水听器进行绝对校准的装置。

1　矢量水听器绝对校准原理

水听器的校准可以分为一级校准和二级校准两个级别[5]。在二级校准中，通常使用标准水听器对待校水听器进行校准，也就是通常所说的比较校准法，而在一级校准中可以使用已校准的振荡器、放大器、电压表和阻抗电桥等仪表，但不能使用已校准的换能器。也就是说，在一级校准法中，使用的各换能器的接收灵敏度或发送响应都是未知的，一级校准法也称之为绝对校准法。

1.1　校准原理

在驻波管中进行矢量水听器的绝对校准，需要

收稿日期： 2017-10-09; **修回日期：** 2017-12-01
作者简介： 成浩(1989－), 男, 河北定州人, 硕士研究生, 研究方向为水声换能器器及测量技术。
通讯作者： 成浩, E-mail: cheng008cheng008@126.com

在驻波管中建立稳定的平面驻波场，通过底部安装好的辐射面板向驻波管内垂直向上发射声波，声波在管口附近的水-空气界面发生反射，建立起稳定的驻波声场。待校水听器的灵敏度通过直接测量水听器的开路电压和间接测量作用在水听器上的实际声压求得，而作用在水听器上的实际声压是利用介质的声阻抗和边界条件以及声源的参数来求得的。

1.2　校准公式

将待校水听器放置于距水面 z 处，根据有限长驻波圆管声场理论，驻波管中的声压表达式为[6]

$$p(z,t) = -\mathrm{j}\frac{\rho}{k}a_0\frac{s_1}{s_2}\frac{\sin(kz)}{\cos(kL)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t} \tag{1}$$

式中：$p(z,t)$ 为驻波场中 z 处的声压；a_0 为辐射板的加速度值；ρ 为声管中水的密度；k 为波数；L 为声管中水柱的高度；s_1 为辐射板面积；s_2 为驻波管内径面积。

由式(1)可知，驻波场内任一点处的声压可以由辐射板加速度推导计算得到，加速度值由安装在辐射板上的加速度计测量得到。设矢量水听器声压通道的输出电压为 e_{oc}，则矢量水听器声压通道的灵敏度 M_{p} 为

$$M_{\mathrm{p}} = \left|\frac{e_{\mathrm{oc}}}{p(z)}\right| = \frac{e_{\mathrm{oc}}}{a_0}\cdot\frac{k}{\rho}\cdot\frac{s_2}{s_1}\cdot\frac{\cos(kL)}{\sin(kz)} \tag{2}$$

将式(1)代入到欧拉公式中，得到驻波管内声场中质点振速的表达式为

$$u(z,t) = -\mathrm{j}\frac{a_0}{\omega}\frac{s_1}{s_2}\frac{\cos(kz)}{\cos(kL)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t} \tag{3}$$

对式(3)进行微分，可以得到驻波管声场中加速度的表达式为

$$a(z,t) = a_0\frac{s_1}{s_2}\frac{\cos(kz)}{\cos(kL)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t} \tag{4}$$

设矢量水听器矢量通道的输出电压为 e_{oc}，则矢量水听器矢量通道的加速度灵敏度 M_{a} 为

$$M_{\mathrm{a}} = \left|\frac{e_{\mathrm{oc}}}{a(z)}\right| = \frac{e_{\mathrm{oc}}}{a_0}\cdot\frac{s_2}{s_1}\cdot\frac{\cos(kL)}{\cos(kz)} \tag{5}$$

根据加速度灵敏度与声压灵敏度之间的关系，可以得到矢量水听器矢量通道的自由场声压灵敏度公式为

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{\omega}{\rho c}M_{\mathrm{a}} = \frac{k}{\rho}\cdot\frac{e_{\mathrm{oc}}}{a_0}\cdot\frac{s_2}{s_1}\cdot\frac{\cos(kL)}{\cos(kz)} \tag{6}$$

最终可以得到矢量水听器矢量通道的自由场声压灵敏度级的计算公式为

$$20\lg\frac{M_{\mathrm{p}}}{M_0} = 20\lg\left(\frac{e_{\mathrm{oc}}}{a_0}\right) + 20\lg\left(\frac{k}{\rho}\right) + 20\lg\left(\frac{s_2}{s_1}\right) + 20\lg\left[\frac{\cos(kL)}{\cos(kz)}\right] - 120 \tag{7}$$

2　矢量水听器绝对校准装置

驻波管绝对校准装置由声管、信号源、功率放大器、电动换能器、辐射板、测量放大器、滤波器、示波器等仪器组成。声管底部安装有辐射板，辐射板由电动换能器驱动向声管中辐射声波，声波在声管口的空气-水界面处发生反射，从而在声管内形成驻波场。电动换能器的发射信号由信号源控制，辐射板的中心刚性固定一只经过校准的加速度计，用于测量辐射板上的加速度。绝对校准装置系统框图和实物图如图 1 和图 2 所示。

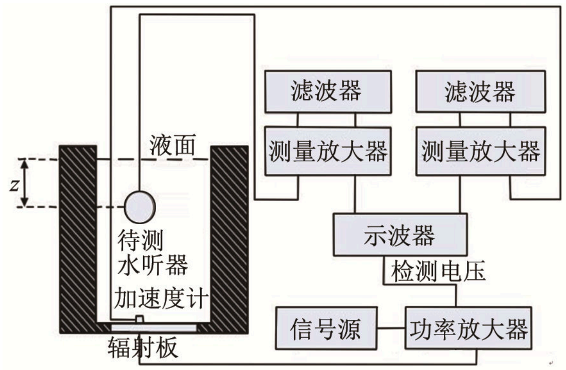

图 1　绝对校准装置系统框图
Fig.1　Block diagram of the absolute calibration apparatus

图 2　矢量水听器绝对校准装置
Fig.2　Picture of the absolute calibration apparatus for vector acoustic hydrophone

校准装置中驻波管的口径为 45 cm，深度为 65 cm；底部辐射板直径为 25 cm。根据圆管中驻波声场理论[7]，活塞声源振动频率应低于管中传播的最低阶次(0,1)简正波的截止频率，管中只存在(0,0)阶简正波，这样可以保证驻波管中的声场在水平方向上为平面波，在垂直方向上符合驻波声场中的声传输理论[1]。在工作频带内，若不能保证辐射面的

振幅和相位一致，也即声源为非对称声源，则驻波管中(0,1)阶简正波的计算公式为[8]

$$f_{01}=\frac{\gamma_{01}c}{2\pi a}=\frac{1.84c}{2\pi a} \tag{8}$$

式中，f_{01}为(0,1)阶简正波的截止频率；γ_{01}为（0,1）阶简正波的特征值；c为水中声速；a为驻波管的半径。

当活塞声源振动频率低于此截止频率时，(0,1)阶简正波不能被激发，管中只存在(0,0)阶简正波。经计算，驻波管校准腔中(0,1)阶简正波的截止频率为1 900 Hz，可以满足10～315 Hz工作频带的要求。

校准装置中需要用加速度计测量辐射板中心处的加速度值，用以推导出待校水听器所在位置处的声压值，因此加速度计在工作频带范围内受到恒定振动激励时，其电压输出应维持不变，这就要求加速度计在工作频带内有一个平坦的加速度灵敏度响应。除此之外还需要考虑加速度计的线性度和动态范围，对于加速度计的线性度，要求加速度计的输出在工作频带内必须与输入呈线性关系，动态范围尽量宽，以保证标准矢量水听器可以在宽工作频带内工作。

在 B&K4808 振动台校准系统上对加速度计的灵敏度进行校准，测试结果如图3所示。

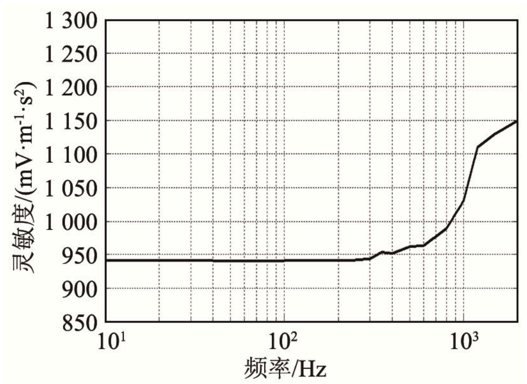

图3 加速度计灵敏度校准结果

Fig.3 Calibration result of accelerometer sensitivity

从测试结果中可以看出，加速度计的灵敏度频响曲线比较平坦，其加速度灵敏度在 10～350 Hz 范围内基本保持在 940 mV·m^{-1}·s^{2})左右。

由 1.2 节可知：当频率一定时，驻波管中轴向声压场随深度变化的规律满足$p(z)\propto\sin(kz)$，轴向质点加速度场随深度变化的规律满足$a(z)\propto\cos(kz)$。为验证驻波管中的声场是否符合理论规律，对驻波管中的轴向声场进行了测量。具体操作为：在 10～315 Hz 频段内按 1/3 倍频程取频点，沿轴向从水面下 10～50 cm 的水柱上每间隔 5 cm 取一个深度，取9个不同的深度，用矢量水听器测量轴心处的水介质质点的加速度值。轴向测量的位置对准辐射板中心，保证标准矢量水听器与加速度计在一条直线上。将待校矢量水听器的输出电压值归一化后分别与式(4)中的 $\cos(kz)$曲线进行对比，绘制驻波管中轴向声场随深度变化的趋势图。下面分别给出10 Hz和315 Hz两个典型频率点处的测量结果，如图4、图5所示。

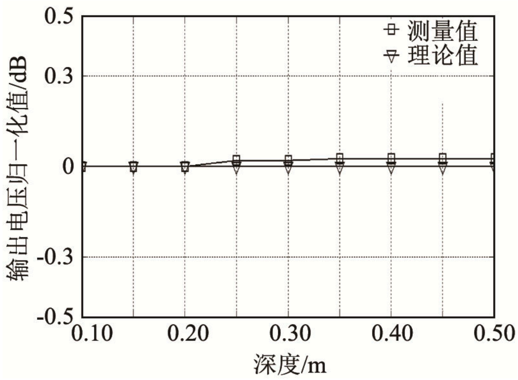

图4 10 Hz 条件下轴向质点加速度场的测量结果

Fig.4 Measurement result of axial particle acceleration at 10 Hz

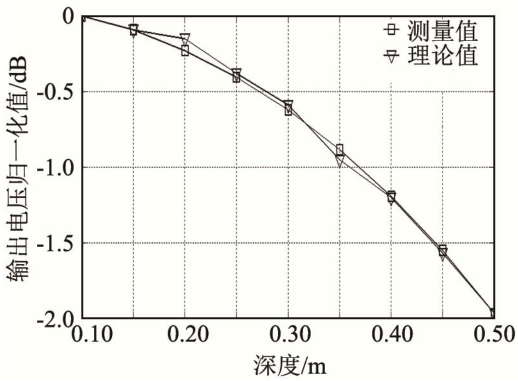

图5 315 Hz 条件下轴向质点加速度场的测量结果

Fig.5 Measurement result of axial particle acceleration at 315 Hz

从图4可知，轴向质点加速度场的实测曲线与理论曲线符合得很好，各个频点所测得的质点加速度沿轴向分布与理论值的偏差均在0.3 dB以内，说明绝对校准装置能够达到较高的精度。

3 矢量水听器的性能测试

以某大学研制的同振式柱形矢量水听器为测量对象，该矢量水听器为二维矢量通道，长度为173 mm，直径为 42 mm，设计灵敏度为−173.3 dB(160 Hz，0 dB=1 V/μPa)。

3.1 灵敏度校准结果

在绝对校准装置上对待校矢量水听器进行校准，矢量水听器矢量通道的自由场声压灵敏度的校准公式由1.2节中绝对校准方法的式(7)给出。将标

准矢量水听器放置在声管中的合适位置，通过记录标准矢量水听器的输出和辐射板上加速度计的输出，就可以计算出标准矢量水听器的自由场声压灵敏度。为了与传统的驻波场中的相对校准法作比对，同时将 B&K8104 标准水听器放入声管中，对标准矢量水听器进行相对校准。绝对校准与相对校准的校准结果如表 1 所示。

表 1　声压灵敏度绝对校准与相对较准的结果(dB)
Table 1　Results of absolute calibration and comparison calibration of pressure sensitivity(dB)

校准方法	10 Hz	12.5 Hz	16 Hz	20 Hz
绝对校准	–199.0	–197.2	–195.1	–193.6
相对较准	–187.8	–187.8	–187.8	–187.8
校准方法	25 Hz	31.5 Hz	40 Hz	50 Hz
绝对校准	–190.9	–189.0	–187.0	–185.2
相对较准	–189.1	–189.4	–186.8	–185.5
校准方法	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz
绝对校准	–183.3	–180.8	–179.4	–177.0
相对较准	–183.4	–181.7	–180.4	–177.7
校准方法	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz
绝对校准	–174.6	–172.3	–169.5	–167.5
相对较准	–175.6	–173.8	–172.3	–170.8

绝对校准结果与相对校准结果的对比曲线如图 6 所示。

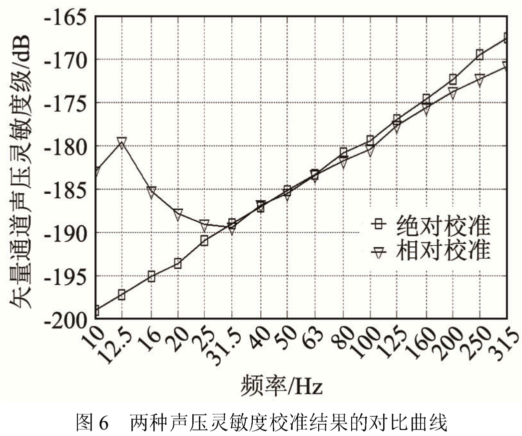

图 6　两种声压灵敏度校准结果的对比曲线
Fig.6　Contrast curves of two calibration results of pressure sensitivity

校准结果显示，待校矢量水听器的自由场声压灵敏度的频响曲线符合每 1/3 倍频程增加 2 dB 的规律，在 10～315 Hz 测量频带范围内，待校矢量水听器矢量通道的灵敏度频响曲线与相对校准结果相比更为平稳，其自由场声压灵敏度的不均性小于 ±1 dB。在 160 Hz 频点上绝对校准结果为–174.6 dB，与理论设计值基本符合，考虑到矢量水听器聚氨酯外壳的透声性能[9]和系统不确定度的影响，校准结果与理论偏差应在±1 dB 的范围内。

在 10～20 Hz 的甚低频段，相对校准结果相比于绝对校准出现了明显的偏差，低频段校准曲线的变化趋势不符合矢量水听器灵敏度的变化规律。其原因在于，在甚低频段，外界传来的噪声和振动会明显影响到同振式矢量水听器的校准精度，相对校准法中使用的标准声压水听器通过与之相连的悬挂装置极易受到外界干扰，同时，在甚低频段发射换能器声源级过低，导致驻波管内声场的信噪比较低，相对校准法需要由标准声压水听器测得的声压作为传递值传递给矢量水听器。在信噪比较低的情况下，测得的声压值精确度较低，如果增大放大器的输出则容易引起声场畸变，因此在甚低频段相对校准结果偏差较大。绝对校准通过加速度计直接测量底部辐射板的加速度值，排除了外界的干扰因素，在不引起声场畸变的情况下，可以通过测得的加速度值计算得到待校矢量水听器所在位置处的声压值，因此校准精度较高。

3.2　指向性校准结果

矢量水听器指向性的测量在绝对校准装置自动测量系统中进行，由电脑控制电机自动旋转，标准矢量水听器的输出电压由采集器采集并存储到电脑中进行处理。对标准矢量水听器的指向性进行测量时，为保证水听器的输出值不受电机旋转产生的机械振动的影响，将标准矢量水听器由弹簧悬挂在支架上，电机带动支架旋转。

对待校矢量水听器在 20 Hz 频率点上的指向性进行测量，并绘制成指向性图，如图 7 所示。从测量结果来看，绝对校准装置在 20 Hz 频率点上具有较高的信噪比，可以满足实验测试的需求。

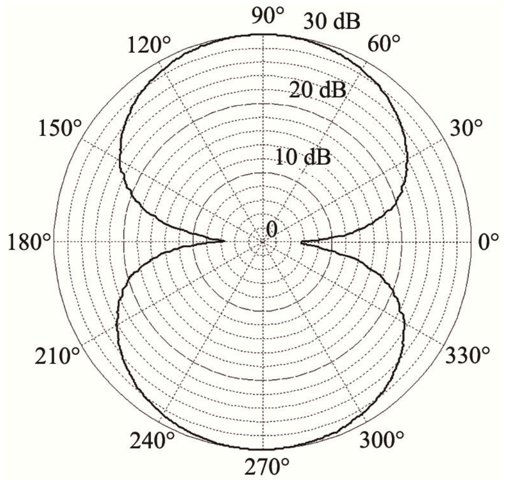

图 7　矢量水听器 20 Hz 的指向性校准结果
Fig.7　Calibration result of the directivity of vector hydrophone at 20 Hz

4 结 论

矢量水听器在工程应用上越来越趋于低频、小型化和高灵敏度，对于甚低频段矢量水听器的校准技术的研究显得尤为重要。本文对矢量水听器绝对校准装置进行了理论分析和声场验证测量，最后对矢量水听器进行了校准。从校准结果来看，提出的矢量水听器绝对校准装置可以对矢量水听器在10～315 Hz 的频带范围内进行声压灵敏度的绝对校准和指向性校准，灵敏度校准结果的不均匀性小于±1 dB。本校准装置的建立可以为后续建立矢量水听器一级校准系统奠定基础。

参 考 文 献

[1] SCHLOSS F, STRASBERG M. Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1962, **34**(7): 958-960.

[2] 莫喜平, 王文芝. 偶极子接收换能器驻波场校准系统的研究[J]. 应用声学, 1998, **17**(6): 14-18.
MO Xiping, WANG Wenzhi. A standing wave calibration system for dipolehydrophones[J]. Applied Acoustics, 1998, **17**(6): 14-18.

[3] 费腾. 矢量水听器校准装置[J]. 声学技术, 2004, **23**(增刊): 290-291.
FEI Teng. Calibration system for vector hydrophones[J]. Technical Acoustics, 2004, **23**(z): 290-291.

[4] GORDIENKO V A. Absolute pressure calibration of acoustic receivers in a vibrating column of liquid[J]. Acoustical Physics, 1994, **40**(2): 243-246.

[5] 郑士杰, 袁文俊. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995: 55-60.
ZHENG Shijie, YUAN Wenjun. Underwater acoustic calibration technique[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995: 55-60.

[6] 成浩. 矢量水听器设计制作及其标准化校准技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
CHENG Hao. Study on design and standard calibration technique of vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.

[7] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 120-130.
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Theoretical foundation of acoustics[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1981: 120-130.

[8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2009: 291-293.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Acoustic foundation[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2009: 291-293.

[9] 张揽月. 导流罩对矢量水听器性能影响研究[J]. 声学技术, 2007, **26**(5): 89-91.
ZHANG Lanyue. The performance of vector hydrophone affected by demo[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(5): 89-91.

上海市声学学会召开常务理事会

上海市声学学会于 2018 年 6 月 28 日下午在同济大学召开常务理事扩大会议，参会人员约 20 人。

2018 年是学会换届年，毛东兴副理事长通报了有关换届事宜。与会常务理事对各专业委员会提出的新理事候选人名单进行了热烈讨论，提出了许多宝贵意见。常务理事会采纳了这些合理意见，将对新理事候选人名单进行调整后上报上海市科协。同时对换届大会的具体事项，做了相关的安排。

会议由龚农斌秘书长主持。

上海市声学学会办公室