文章编号:1000-5773(2013)03-0454-07

10 MPa静水压下20 Hz～200 kHz标准水听器校准*

陈　毅,黄勇军,费　腾

(杭州应用声学研究所,浙江杭州　310012)

摘要:介绍了在10 MPa静水压下校准20 Hz～200 kHz标准水听器的耦合腔互易法和自由场互易法,建立了最高静水压力为10 MPa、工作频率范围为20 Hz～3.15 kHz的耦合腔互易法校准装置和工作频率范围为3.15～200 kHz的自由场互易法校准装置。利用这些校准装置,分别对RHC14标准水听器和RHS30标准水听器进行校准,得到了它们在10 MPa静水压力下的灵敏度校准结果。不确定度分析表明,耦合腔互易法校准装置的扩展不确定度(k=2)为0.5 dB,自由场互易法校准装置的扩展不确定度(k=2)为0.7 dB(低于100 kHz频段)和0.9 dB(100～200 kHz频段)。这些校准装置和能力的建立,为深潜水声设备研制奠定了测试基础。

关键词:校准;标准水听器;高静水压;灵敏度

中图分类号:TB52　　**文献标识码**:A

1　引　言

海洋产业的开发是我国21世纪国民经济发展的重点之一。随着海洋开发的不断深入,深水资源的开发利用已提上议事日程,各种深水海洋仪器则是深海开发不可缺少的设备。另外,随着我国海军的发展,各种深水工作装备如大深度潜艇、深水鱼雷越来越多,工作深度越来越深。这些深水仪器和装备都配备耐高静水压水下声学系统,它们在深水下的性能与常压下不同,很难通过理论计算准确得出,最可靠的方法是在实际环境条件下进行测试。为了保证这些测试的有效性和准确性,首先需要解决可在高静水压下工作的标准水听器灵敏度的精确校准问题。

美国海军水下战争中心的水声参考分部(USRD)早在20世纪50年代初就建立了高静水压下水声声压的校准能力和测试条件,现自由场条件下最高静水压测试能力已发展到18.6 MPa[1]。英国国家物理实验室(NPL)建立了最高静水压为6.8 MPa的高压消声水池[2]。通过多年的建设和发展,杭州应用声学研究所建立了最高10 MPa静水压下20 Hz～200 kHz频率范围标准水听器的校准能力,覆盖绝大多数水声设备的工作频率,对深水水声技术的发展和深潜水声设备的研制起到了非常重要的保障作用。

2　校准方法

10 MPa静水压下20 Hz～200 kHz频率范围标准水听器的校准采用电声互易原理,其中,在20 Hz～3.15 kHz频段内利用耐高静水压耦合腔中的声压场进行校准,在3.15～200 kHz频段内利用高压消声水罐中的自由场进行校准,它们应用的都是三换能器互易校准法[3-4]。即通过分别测量发射换能器F、互易换能器H和标准水听器J两两组成的3个换能器对FH、HJ和FJ的激励电流(I_F、I_H和I_F')和

* **收稿日期**:2011-05-13;**修回日期**:2011-09-28

作者简介:陈　毅(1973—),男,硕士,主要从事水声计量测试技术研究. E-mail:y.chen@163.com

开路电压(U_{FH}、U_{HJ}和U_{FJ}),得到各换能器对的电转移阻抗模$|Z_{FH}|$、$|Z_{HJ}|$和$|Z_{FJ}|$,通过选用相应的互易常数,得到被校标准水听器的灵敏度级。其校准原理图如图 1 所示。

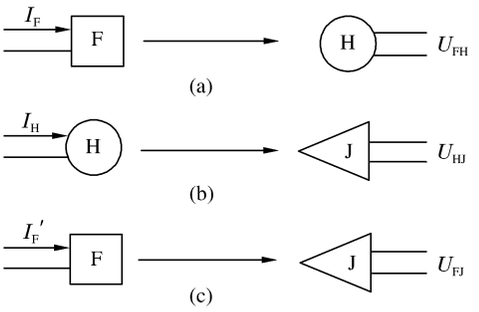


图 1　互易校准原理图

Fig. 1　The diagram of principle of reciprocity calibration

采用耦合腔互易法进行校准时,标准水听器的灵敏度级按公式(1)计算

$$M = 10\lg|Z_{FJ}| + 10\lg|Z_{HJ}| - 10\lg|Z_{FH}| + 10\lg J_a - 120 \quad (1)$$

式中:M 为标准水听器 J 的声压灵敏度级,单位为 dB,基准值为 1 MV/Pa;J_0为耦合腔互易常数,单位为 W/(m·Pa^2),按公式(2)计算

$$J_a = \omega C_a \quad (2)$$

式中:ω 为角频率,$\omega = 2\pi f$,f 为测量频率,单位为 Hz;C_a 为耦合腔中媒质的声顺,单位为 m^3/Pa。

若耦合腔和换能器的声阻抗远大于腔内媒质的声阻抗,且腔内无释压材料,则腔内媒质的声顺按公式(3)计算

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2} \quad (3)$$

式中:V 为腔内媒质的体积,单位为 m^3;ρ 为腔内媒质的密度,单位为 kg/m^3;c 为腔内媒质的声速,单位为 m/s。

若校准时取 $I_F = I_F'$,则公式(1)可转化为公式(4)

$$M = 10\lg U_{FJ} + 10\lg U_{HJ} - 10\lg U_{FH} - 10\lg I_H + 10\lg f + 10\lg V - 10\lg\rho - 20\lg c - 112 \quad (4)$$

采用自由场互易法进行校准时,标准水听器 J 的灵敏度级按公式(5)计算

$$M = 10\lg|Z_{FJ}| + 10\lg|Z_{HJ}| - 10\lg|Z_{FH}| + 10\lg d_{FJ} + 10\lg d_{HJ} - 10\lg d_{FH} + 10\lg J_S - 120 \quad (5)$$

式中:M 为 J 的自由场[电压]灵敏度级,单位为 dB,基准值为 1 MV/Pa;d_{FH}、d_{HJ}、d_{FJ}分别为 F 与 H、H 与 J、F 与 J 参考中心间的距离,单位为 m;J_S为球面波互易常数,单位为 W/(m·Pa^2),按公式(6)计算

$$J_S = \frac{2}{\rho f} \quad (6)$$

若校准时取 $I_F = I_F'$、$d_{FH} = d_{FJ} = d_{HJ} = d$,则公式(5)可转化为公式(7)

$$M = 10\lg U_{FJ} + 10\lg U_{HJ} - 10\lg U_{FH} - 10\lg I_H + 10\lg d - 10\lg\rho - 10\lg f - 117 \quad (7)$$

3　校准设备

3.1　耦合腔互易法校准装置

3.1.1　耦合腔

耦合腔互易法校准所用声场设施是耦合腔,腔体的几何形状为圆柱形,其剖面示意图如图 2 所示。腔体由不锈钢制成,内半径 r 大于厚度 t,腔体长度 l 小于腔内液体中被校上限频率对应的声波长度的十分之一。在 20 Hz～3.15 kHz 频率范围内,耦合腔中声压随声场位置的变化不超过±0.3 dB。校准时,耦合腔应与周围结构和机械设备作隔振处理。

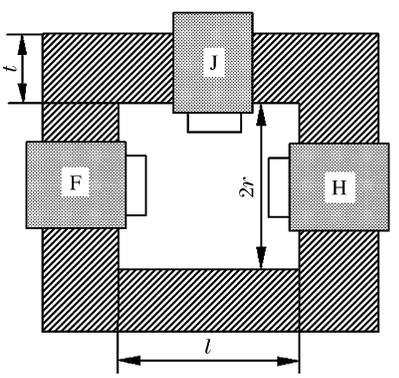


图 2　耦合腔剖面示意图

Fig. 2　Schematic diagram of section plane of coupler

3.1.2　装置组成和测量过程

耦合腔互易法校准装置的框图如图 3 所示。测量时,计算机控制信号发生器输出测量所需的信号,

通过功率放大器激励发射换能器 F 或互易换能器 H 工作，在耦合腔中产生测量所需的声场。H 或 J 输出声信号经前置放大器放大后，与取样电流一起输入电子开关进行转接，经测量放大器和滤波器放大、滤波，由数字电压表进行读数。示波器用于观察信号波形。

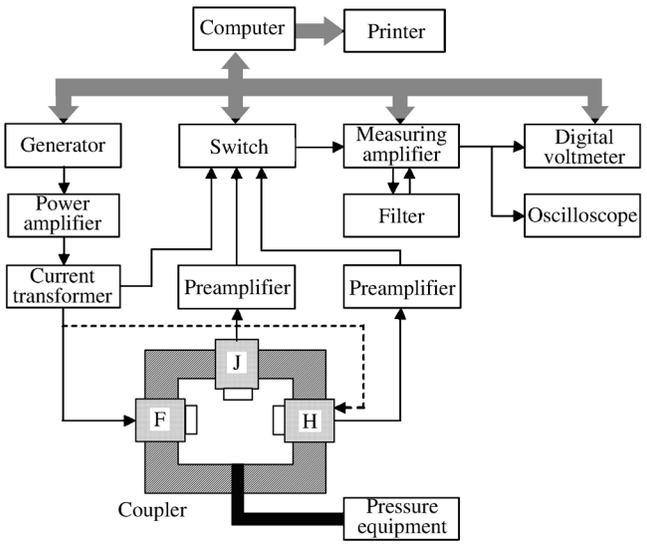


图 3 耦合腔互易法校准装置框图

Fig. 3 Shematic diagram of coupler reciprocity calibration facility

3.2 自由场互易法校准装置

3.2.1 高压消声水罐

自由场互易法校准时所用的声场设施是直径 4 m、长 12 m 的高压消声水罐，罐体的几何形状为圆筒形，两端为半球体，呈卧式放置，其剖面示意图如图 4 所示。校准时，高压消声水罐与周围结构和机械设备隔振，罐内水质清洁，无水流影响；罐内空间应足够大，使发射换能器、互易换能器和标准水听器相互之间的距离能满足远场自由场条件。

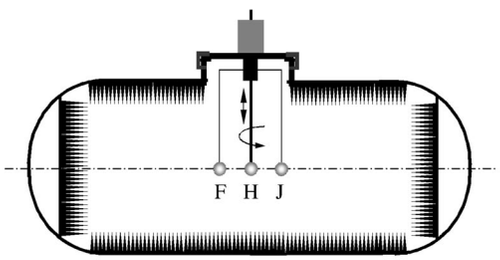


图 4 高压消声水罐示意图

Fig. 4 Schematic diagram of section plance of hydrostatic anechoic pressure vessel

3.2.2 装置组成和测量过程

自由场互易法校准装置的框图如图 5 所示。自由场互易法测量时，计算机控制信号发生器输出测量所需的信号，通过功率放大器激励发射换能器 F 或互易换能器 H 工作，在高压消声水罐中产生测量所需的声场。H 或 J 输出声信号与来自电流取样器的取样电流一起，输入电子开关进行转接，经测量放大器放大后，输入滤波器进行滤波，再由数字示波器进行采样。

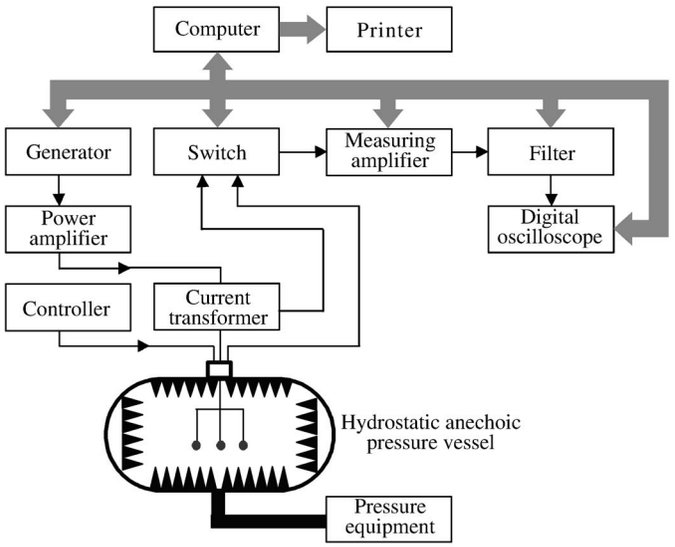


图 5　自由场互易法校准装置框图

Fig. 5　Schematic diagram of free-field reciprocity calibration facility

4　校准结果

采用 RHC14 和 RHS30 水听器作为标准水听器,分别利用耦合腔互易法和自由场互易法进行校准。RHC14 和 RHS30 标准水听器都由杭州应用声学研究所制造,其中 RHC14 标准水听器的敏感元件由直径为 14 mm 的 3 个圆管构成,RHS30 标准水听器的敏感元件由 2 个直径为 30 mm 的压电半球构成。

4.1　耦合腔互易法校准结果

在 10 MPa 静水压下,采用耦合腔互易法测量 RHC14 标准水听器在 20 Hz～3.15 kHz 频段的声压灵敏度,其校准结果见表 1。

表 1　10 MPa 静水压下 RHC14 标准水听器校准结果

Table 1　Calibrated results of RHC14 standard hydrophone at 10 MPa hydrostatic pressure

f/(Hz)	M/(dB)	f/(Hz)	M/(dB)	f/(Hz)	M/(dB)
20	−197.46	160	−197.48	1 000	−197.49
25	−197.50	200	−197.48	1 250	−197.56
31.5	−197.50	250	−197.47	1 600	−197.66
40	−197.50	315	−197.47	2 000	−197.15
63	−197.49	400	−197.46	2 500	−197.70
80	−197.49	500	−197.47	3 000	−198.08
100	−197.48	630	−197.47	3 150	−198.18
125	−197.48	800	−197.48		

可见,RHC14 标准水听器具有很好的性能。在 20 Hz～1.25 kHz 频段,RHC14 标准水听器的灵敏度曲线非常平坦;在 1.60～3.15 kHz 频段,灵敏度曲线略有起伏,与整条曲线平均值(约为−197.54 dB)的偏差在−0.64～+0.39 dB 之间。

4.2 自由场互易法校准结果

在 10 MPa 静水压下，采用自由场互易法测量 RHS30 标准水听器在 3.15～200 kHz 频段的自由场灵敏度，其校准结果见表 2。

表 2 10 MPa 静水压下 RHS30 标准水听器校准结果

Table 2 Calibrated results of RHS30 standard hydrophone at 10 MPa hydrostatic pressure

f/(kHz)	M/(dB)	f/(kHz)	M/(dB)	f/(kHz)	M/(dB)
3.15	−191.11	16	−193.27	80	−205.21
4	−191.19	20	−194.22	100	−211.32
5	−191.43	25	−194.51	125	−215.91
6.3	−191.37	31.5	−194.65	160	−219.35
8	−191.93	40	−193.73	200	−225.26
10	−192.47	50	−192.35		
12.5	−192.92	63	−195.86		

由表 2 可见，在 3.15～50 kHz 频段，RHS30 标准水听器的灵敏度曲线比较平坦，与该段曲线平均值(约为−192.70 dB)的偏差在−1.95～+1.59 dB 之间；在 63～200 kHz 频段，灵敏度曲线开始下降，最低为−225.26 dB，起伏超过 30 dB。

5 测量不确定度评定[5]

耦合腔互易法校准的测量不确定度主要来源如表 3 所示。取 6 次重复测量的标准偏差作为 A 类标准不确定度，最后计算得到的 RHC14 标准水听器耦合腔互易法校准的扩展不确定度(k=2)为 0.5 dB。

表 3 耦合腔法校准的不确定度估算

Table 3 Uncertainty estimation of coupler reciprocity method calibration

Source of uncertainty	Value/(dB)
Asymmetry of sound field in coupler assumed (Type B)	0.15
Reciprocal deviation of reciprocal transducer measured (Type B)	0.06
Voltage incorrectly measured (Type B)	0.03
Incorrect sensitivity of current transformer assumed (Type B)	0.05
Incorrect liquid volume of coupler measured (Type B)	0.02
Incorrect velocity of sound in coupler assumed (B)	0.09
Incorrect density of liquid assumed (Type B)	0.06
Incorrect frequency of generator assumed (Type B)	0
Standard uncertainty of measurement of sensitivity (Type A)	0.13
Expanded uncertainty(Coverage factor k=2)	0.50

自由互易法校准的测量不确定度主要来源如表 4 所示。取 6 次重复测量的标准偏差作为 A 类标准不确定度，最后计算得到的 RHS30 标准水听器自由场互易法校准的扩展不确定度(k=2)为 0.7 dB(小于 100 kHz)或 0.9 dB(100～200 kHz)。

表 4　自由场互易法校准的不确定度估算

Table 4　Uncertainty estimation of free-field reciprocity method calibration

Source of uncertainty	Value/(dB)
Deficiency of input impedance of Preamplifier assumed (Type B)	0.06
Incorrect sensitivity of current transformer assumed (Type B)	0.05
Quantization error of digital oscilloscope assumed (Type B)	0.03
Reciprocal deviation of reciprocal transducer measured (Type B)	0.17(<100 kHz) 0.29(≥100 kHz)
Nonlinearity of transducer and power amplifier measured (Type B)	0.12(<100 kHz) 0.23(≥100 kHz)
Deviation of directivity of transducer assumed (Type B)	0.10(<100 kHz) 0.20(≥100 kHz)
Deviation of vertical position of transducer assumed (Type B)	0.10(<100 kHz) 0.20(≥100 kHz)
Incorrect distance measured (Type B)	0.05
Incorrect density of water assumed (Type B)	0.06
Incorrect frequency of generator assumed (Type B)	0.00
Incorrect steady state of tone-burst assumed (Type B)	0.09
Interfere of irregular noise assumed (Type B)	0.06
Interfere of electromagnetism assumed (Type B)	0.05
Standard uncertainty of measurement of sensitivity (Type A)	0.12(<100 kHz) 0.09(≥100 kHz)
Expanded uncertainty (Coverage factor $k=2$)	0.7(<100 kHz) 0.9(≥100 kHz)

6　结 束 语

通过耦合腔互易法和自由场互易法研究,耦合腔互易法校准装置和自由场互易法校准装置建设,以及 RHC14、RHS30 标准水听器的校准和测量不确定度评定,建立了最高 10 MPa 静水压下 20 Hz～200 kHz 标准水听器的校准能力。这些校准方法和测试技术的发展,进一步丰富和完善了水声声压计量技术体系,为深潜水声装备研制奠定了良好的测试基础。

References:

[1] van Buren A L, Blue J E. Calibration of underwater acoustic transducers at NRL/USRD, power transducer for sonics and ultrasonics [C]//Proceedings of the International Workshop. Toulon, France, 1990: 221-241.

[2] Beamiss G A, Hayman G, Robinson S P. The provision of standards for underwater acoustics at simulated ocean conditions by use of the NPL acoustic pressure vessel, CMAM 76 [R]. London, UK: The National Physical Laboratory, 2001.

[3] International Electrotechnical Commission. IEC 60565: Underwater acoustics-hydrophones - calibration in the frequency range 0.01 Hz to 1 MHz [Z]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2006.

[4] Chen Y, Chen W H, Yuan W J, et al. The development of free-field underwater acoustic pressure standard at high hydrostatic pressure [J]. ACTA Metrologica Sinica, 2008, 29(3): 257-261. (in Chinese)

陈 毅,陈卫华,袁文俊,等. 高静水压下自由场水声声压计量标准装置研究 [J]. 计量学报,2008,29(3):257-261.
[5] BIPM,IEC,IFCC,ISO,IUPAC,IUPAP,OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement [Z]. Geneva,Switzerland:International Organization for Standardization,1995.

Calibration of Standard Hydrophones in the Frequency Range of 20 Hz to 200 kHz at 10 MPa Hydrostatic Pressure

CHEN Yi,HUANG Yong-Jun,FEI Teng

(*Hangzhou Applied Acoustics Research Institute*,*Hangzhou* 310012,*China*)

Abstract: This paper describes the coupler reciprocity method and free-field reciprocity method used for standard hydrophones calibration in the frequency range of 20 Hz to 200 kHz at 10 MPa hydrostatic pressure,and the coupler reciprocity calibration facility working in the frequency from 20 Hz to 3.15 kHz and free-field reciprocity calibration facility working in the frequency from 3.15 kHz to 200 kHz was established on these methods. Standard hydrophones RHC14 and RHS30 were calibrated separately using these facilities,and their sensitivities at 10 MPa hydrostatic pressure was presented. Analyze of measurement uncertainties proved that the expand uncertainty (at $k=2$) of coupler reciprocity calibration facility was 0.5 dB,and free-field reciprocity calibration facility was 0.7 dB (below 100 kHz) or 0.9 dB (100 kHz to 200 kHz). The construction of these facilities and capabilities sets the test foundation for deep-diving underwater sound devices.

Key words: calibration; standard hydrophone; high hydrostatic pressure; sensitivity