

研究论文

# 浅地层剖面仪关键声学参数的检测技术研究

王方旗<sup>1</sup>,周兴华<sup>1,2</sup>,林旭波<sup>1</sup>,陶常飞<sup>1</sup>,崔力<sup>1</sup>,  
丁继胜<sup>1</sup>,梁冠辉<sup>1</sup>,董立峰<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所,山东青岛266061; 2. 山东科技大学海洋科学与工程学院,山东青岛266590)

**摘要:** 基于在消声水池中对参量阵型浅地层剖面仪进行的声学参数测量试验及数据的处理分析,探索性地提出了一套完整的浅地层剖面仪关键声学参数检测与评价的解决方案。方案主要包括4部分:1)检测平台构建:简述了检测平台的主要组成部分,并对消声水池的建设提出了基本的技术要求;2)声学参数测量:介绍了浅地层剖面仪的声源级、频率和脉冲长度测量的方法和操作要点;3)数据处理分析:论述了测量数据预处理的目的和方法,给出了声学参数计算的主要公式和方法;4)符合性分析:分析各声学参数实测值与标称值的符合性及偏离度。本试验发现所用的浅地层剖面仪的关键声学参数的实测值与其标称值偏离较大,即说明书给出的标称值仅是参考性数值。因此,在进行浅地层剖面仪的检测与校准工作时,应对新购仪器进行强制性首检以获取其各参数准确的初始值。

**关键词:** 浅地层剖面仪;声学参数;声源级;频率;脉冲长度

中图分类号:P715

文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2021)01-0118-10

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.012

**引用格式:** WANG F Q, ZHOU X H, LIN X B, et al. Research on measurement technique of acoustic parameters of sub-bottom profiler[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 118-127. 王方旗,周兴华,林旭波,等. 浅地层剖面仪关键声学参数的检测技术研究[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 118-127.

浅地层剖面仪是基于声学原理研发的用于连续探测水下浅部地层结构和构造的地球物理探测仪器。20世纪40年代国外首次推出了最原始的浅地层剖面仪,20世纪六七十年代出现了商品设备,但由于受当时技术基础的限制,无法实现复杂信号的处理、高分辨率的地层探测和实时成像成图<sup>[1]</sup>。20世纪末,电子计算机技术的快速发展、数字信号处理、海量数据存储和电子自动成图等新技术促进了新型高分辨率浅地层剖面仪的问世,并得到了广泛应用。进入21世纪后,出现了3D Chirp浅地层剖面仪,实现了海底地质结构三维图像的探测<sup>[2-3]</sup>。在我国利用浅地层剖面仪的起步虽然相对较晚,但在20世纪末到21世纪初,其已经被广泛地应用于海洋区域地质调查、海洋工程地质勘察、海洋灾害地质调查、海底管线路由勘察和海洋地质科学等领域。

目前,浅地层剖面探测技术已经相对成熟,应用越来越广泛,但由于缺乏仪器设备检测与校准的方法体系和规范、标准,无法对其进行规范有效的检测,而只能采取自校和比测的方法来评价其性能状态,且无统一规范,缺少基本的仪器运行质量评价程序,致使获取的数据资料精度不高,从而影响探测结果的准确性和可靠性<sup>[4]</sup>。因此,急需研究浅地层剖面仪检测与校准的关键技术和方法,建立科学的评价体系,以保证仪器设

收稿日期:2019-08-30

资助项目:国家重点研发计划项目——海上搜寻演示验证技术与评估(2017YFC0306003);国家自然科学青年基金项目——基于高分辨率声学剖面与钻孔岩心对比的金州湾海底地层声速研究(41606056);海洋公益性行业科研项目——常用海底声呐测量仪器计量检测关键技术研究与示范应用(201305034)

作者简介:王方旗(1981—),男,工程师,主要从事海洋地球物理调查技术方面研究. E-mail: sdhdwfq0317@fio.org.cn

(陈靖 编辑)

备的有效性、稳定性和可靠性。浅地层剖面仪的性能检测与评价可采用“两步法”进行:第一步为声学物理参数测量,获取与仪器探测性能有关的关键声学参数实际值,如声源级、声波频率、脉冲长度及波束角等;第二步为实际探测性能评价,通过海上试验来检测和评价仪器的实际探测性能指标,如信噪比、信混比、垂直分辨率及穿透深度等<sup>[4-5]</sup>。本文以 SES-2000 Standard 参量阵型浅地层剖面仪(以下简称“SES-2000 SBP”)为例研究了在消声水池中声学物理参数的检测技术和数据处理方法,包括检测平台构建、声学参数测量和数据处理以及测量结果分析,初步形成了一套完整的浅地层剖面仪关键声学参数检测与评价的解决方案,可为后期实现浅地层剖面仪的强制性检定提供方法指导和技术支撑。

## 1 检测与评价流程

浅地层剖面仪声学参数检测与评价流程主要包括 4 部分:检测平台构建、声学参数测量实施、测量数据的处理和分析及声学参数的符合性分析(图 1)。本文以常用的 SES-2000 SBP 的声学参数测量试验为例对各部分内容进行阐述,试验中采用了脉冲声技术的测量方法,可将由边界造成的声反射对声场的影响通过时域滤波消除从而获得自由场条件<sup>[6]</sup>。

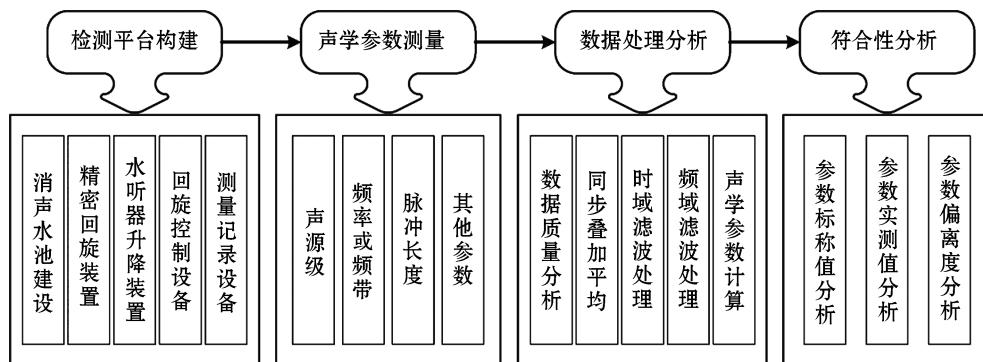


图 1 声学参数检测与评价流程

Fig.1 Flow chart for measuring and evaluating acoustic parameters

## 2 检测平台构建

检测平台构建是浅地层剖面仪声学参数测量中最基础和最关键的步骤,需遵循相关标准和规范的规定<sup>[4]</sup>。检测平台主要由消声水池、精密回旋装置、水听器升降装置、回旋控制设备和测量记录设备五部分组成(图 2)。

消声水池的环境条件、大小、水深和消声材料的性能等均需满足相关标准的规定和实际测量的要求,对测量有影响的环境条件应加以说明,应使温度、静水压、电接地、频率和声负载等环境条件保持恒定<sup>[7]</sup>。水池的大小和水深主要取决于声波的频段、声基阵的最大线度以及消声材料

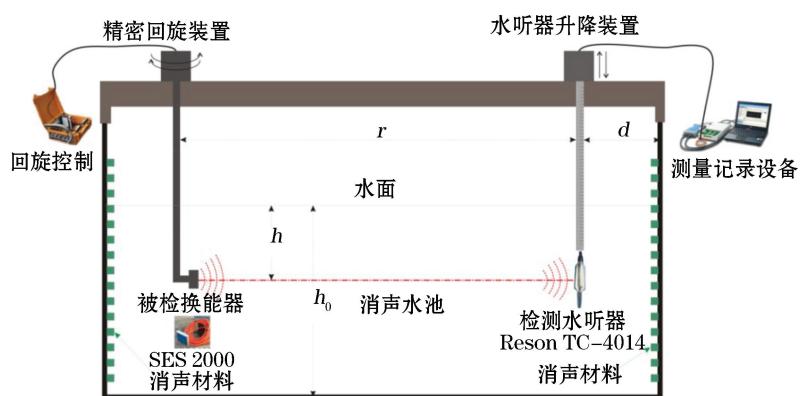


图 2 声学参数检测平台

Fig.2 Schematic diagram of platform for testing acoustic parameters

的性能;被检换能器与检测水听器间的距离需满足远场条件。

本次试验中,消声水池长  $L=40$  m,宽  $W=10.8$  m,水深  $h_0=8.0$  m,测量时换能器吃水深度  $h=3.5$  m,被检换能器与检测水听器水平距离  $r=7.5$  m,水听器距离池壁  $d=0.9$  m;根据水池的尺寸可判断本次试验满足远场条件,同时采用脉冲声技术可以获得自由场条件,因此适用于本次浅地层剖面仪的声学参数测量。消声材料应尽量满足吸声系数和吸声频段的要求,必要时池底、水面和吊装架等也应敷设消声材料,最大限度地消除干扰源。精密回旋装置用于调整被检换能器的声轴,使其对准检测换能器,能实现高精度的小角度等角旋转。水听器升降装置用于调整水听器的垂直高度。回旋控制设备通过控制回旋装置的旋转达到调整被检换能器声轴方向的目的,测量记录设备用于控制声信号测量,调节采集参数并记录测量结果<sup>[4]</sup>。

### 3 声学参数测量

浅地层剖面仪的探测性能主要是指其穿透沉积层厚度的能力和垂直分辨率,其声学物理参数是支撑系统能达到其设计探测性能的基本数据,主要包括:声源级、频率和脉冲长度。声源级反映的是声源发射的声信号能量的大小,主要影响仪器的穿透能力,声源级越大,穿透能力越强;浅地层剖面仪发出的声信号具有一定宽度的频带,通常用其中心频率表示,一般来说,频率越低,穿透能力越强,但是频率较低往往会导致较低的垂直分辨率<sup>[8]</sup>;辐射声信号的脉冲长度越长,穿透能力越强,垂直分辨率越低<sup>[9-10]</sup>。

声源级需在仪器输出能量设置为最大时进行测量,关键是要确定待检换能器的声轴中心(等效声中心)并使之与检测水听器的中心对准。如图 2 所示,首先通过精密回旋装置将待检换能器大致的声轴方向对准检测水听器,通过升降装置按由低往高调整水听器的高度并逐一进行测量,接收声压最大时即为待检换能器声轴的高度;然后将水听器固定在待检换能器声轴高度的位置,通过精密回旋装置控制待检换能器按照小角度等角旋转并逐一进行测量,接收声压最大时即可认为待检换能器的声轴中心与检测水听器的中心是对准的,此时调整浅地层剖面仪的参数设置并进行多次测量,测量数据可同时实现声源级、频率和脉冲长度的计算。

试验采用 SES-2000 SBP 为参量阵式,其主频(一次频率)约为 100 kHz,用于测量水深;差频(二次频率)分为 7 档,范围为 4~15 kHz,用于探测浅地层。测量时可以通过采集软件进行控制的主要参数:差频频率、脉冲长度、波束角方向、发射频率和记录量程等。其中差频频率为用户可选 4,5,6,8,10,12 和 15 kHz,每个频率选择对应 2~5 档(67~500  $\mu$ s)可选的脉冲长度设置。为实现声源级、频率和脉冲长度的测量,本次试验时对 SES-2000 SBP 的 7 档差频频率和对应的脉冲长度设置均进行了测量,限于篇幅,文中仅以代表性的其中 4 档的试验数据进行展示(表 1)。

表 1 SES-2000 SBP 发射参数设置

Table 1 Controlling parameter settings for SES-2000 SBP

试验编号	差频频率 /kHz	信号周期数 /个	脉冲长度 / $\mu$ s
1	4	1	250
2	4	2	500
3	8	1	125
4	8	2	250
5	8	3	375
6	8	4	500
7	12	1	83
8	12	2	167
9	12	3	250
10	12	4	333
11	12	5	417
12	15	1	67
13	15	2	133
14	15	3	200
15	15	4	267
16	15	5	333

## 4 数据处理分析

在测量过程中,由于受到外界条件、测量因素及仪器因素等的影响,采集的声脉冲信号会存在各种各样的干扰,统称为“噪声”。试验中的噪声主要有环境噪声、随机噪声、电噪声及来自消声水池壁、底和水面的反射噪声等。实际测试时,可将环境噪声、随机噪声和电噪声同时进行评测,即在待检换能器不发射信号的状态下水听器接收信号,通过处理和分析接收到的数据进行噪声评价<sup>[4]</sup>,噪声水平应不大于1.0 dB。池壁、底和水面的反射噪声与直达声脉冲在声程上有明显差别,可采用时域滤波法进行有效去除。

### 4.1 同步叠加平均

同步叠加平均是一种理论相对简单的信号处理方法,周期性或可重复性信号经过多次取样叠加后,其信噪比有所提高,叠加次数越多,信噪比改善越好。如果叠加平均次数足够高,甚至可以从强噪声的背景中提取极其微弱的信号<sup>[11]</sup>。在其他外界条件保持一致的情况下,当换能器发射参数和水听器采集参数不变时通过重复发射和接收操作而获取的信号可以看作是同步重复性信号,为消除外界噪声和偶然性噪声的干扰,提高信噪比,可采用同步叠加平均方法对信号进行处理。在本次声学参数测量时,对于试验的每一种参数组合设置都进行了10次重复测量,数据处理时首先采用同步叠加平均法进行处理,获得每一种参数组合下的高信噪比声脉冲信号,然后进行时域滤波和频域滤波处理。

### 4.2 时域滤波处理

声学参数测量的关键是要获取纯净的待检换能器辐射到检测水听器的直达波信号。采用脉冲声技术的测量方法非常适合在有限尺寸的消声水池中进行试验,可将边界造成声反射对声场的影响从时间上分离开来而获得自由场条件,也就是时域滤波。

图3a为发射频率为12 kHz,脉冲长度为417  $\mu$ s时采集到的声脉冲信号,可以明显观察到存在3个脉冲信号,显然最强的信号S1是我们所需要的直达波信号。由图3中可知:信号S2与S1之间的走时差为1.226 ms,信号S3与S1之间的走时差为1.801 ms。假设测量时水的声速为1 500  $m \cdot s^{-1}$ (此数值在试验时未能进行实测),则S2与S1之间的声程差为1.84 m,S3与S1之间的声程差为2.70 m。通过对图2的相关尺寸数据可以确定:S2是来自于水池壁的反射信号,S3则是来自于水面的反射信号。由于来自于池底的反射信号与直达信号之间的声程差更大,因此未包含在采集的数据里。确定3个脉冲信号的来源后,可采用时域滤波处理获得相对纯净的直达波信号(图3b)。

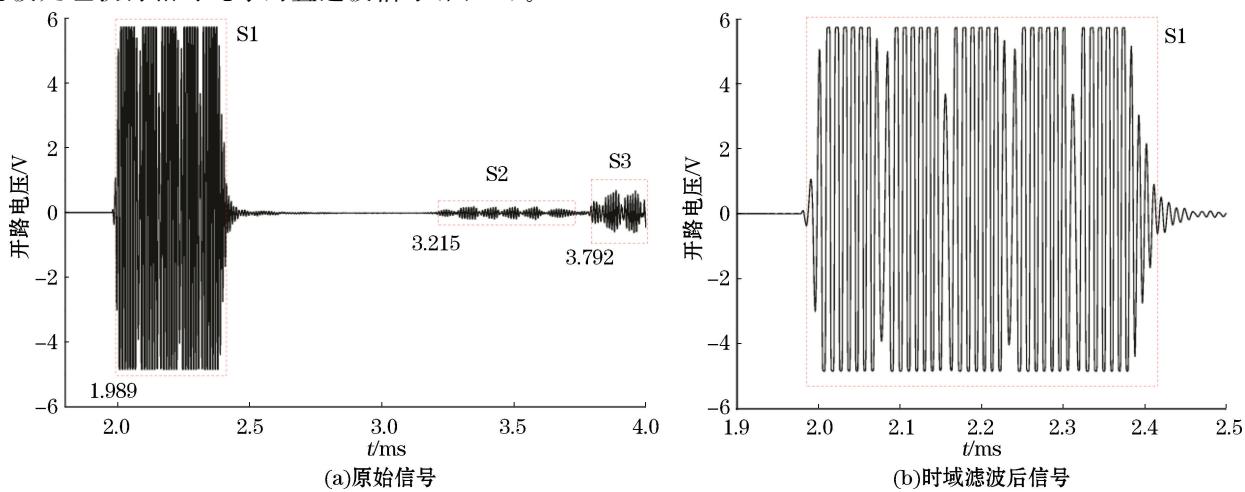
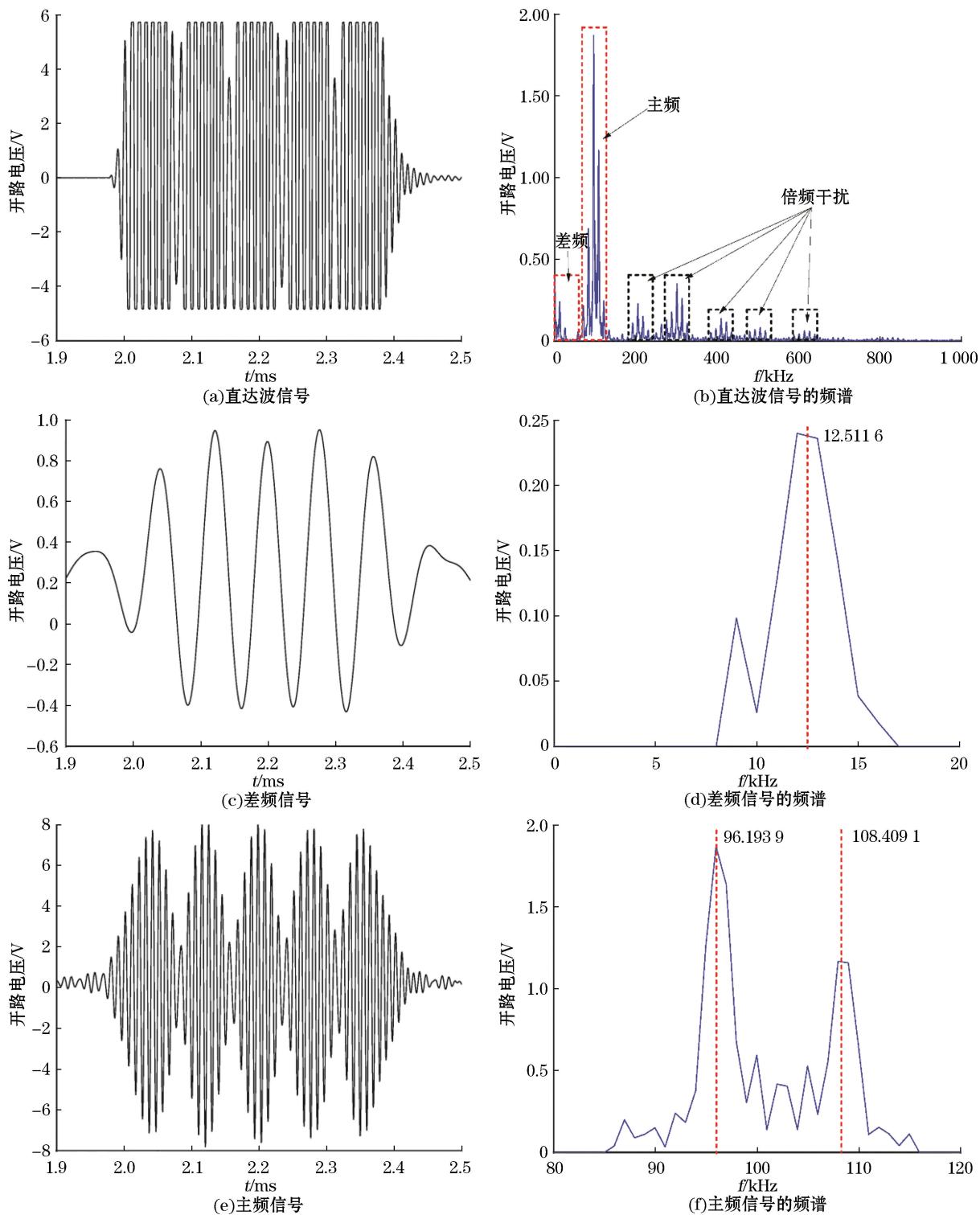


图3 时域滤波

Fig.3 Time domain filtering

### 4.3 频域滤波处理

SES-2000 SBP 发射的声波信号里至少包含 3 个有效的频率成分(2 个主频和 1 个差频), 而这些频率都



注: 差频信号为直达波信号经 8.8~17.7 kHz 滤波; 主频信号为直达波信号经 71~142 kHz 滤波

图 4 频域滤波

Fig.4 Frequency domain filtering

需要通过消声水池中的测量分别进行检测和分析;同时,采集到的信号中还包含了其他干扰信号,因此需采用频域滤波处理方法去除干扰以获得只包含一种有效频率成分的纯净信号。图4a是经过时域滤波处理后得到的发射频率为12 kHz,脉冲长度为417 μs时的直达波信号;图4b是其频谱,可见信号中包含多种频率成分。其中频率在100 kHz附近的是主频信号,振幅最大;频率在12 kHz附近的是差频信号,振幅次之;频率分别为200,300,400,500和600 kHz附近的是主频的倍频信号,幅值逐渐变小。对浅地层剖面仪来说,主频信号和差频信号是有效信号,需采用频域滤波分别进行分离和提取,而倍频信号则是干扰信号,需去除。

频域滤波时的中心频率应使用国家标准给出的推荐值<sup>[12]</sup>,并采用倍频程带通滤波器。图4c是直达波信号经过带通8.8~17.7 kHz滤波后得到的低频率的差频信号,图4d是其频谱,峰值分析后得到振幅最大处对应的频率值为12.511 6 kHz,这个频率即SES-2000 SBP的标称频率之一(12 kHz)。图4e是直达波信号经过带通71~142 kHz滤波后得到的高频率的主频信号,图4f是其频谱,峰值分析后得到振幅最大处的2个主频分别为96.193 9和108.409 1 kHz。

#### 4.4 声学参数计算

##### 4.4.1 声源级

声源级是描述声呐发射的声信号强弱的物理量,根据其定义:在发射器辐射声场中,离开声源等效声中心单位距离( $r_0=1$  m)处的声压级或声强级<sup>[13-14]</sup>,声源级的计算公式为

$$SL = 20\lg e_{oc} - 20\lg M - 20\lg p_{ref} + 20\lg r - 20\lg r_0, \quad (1)$$

式中: $e_{oc}$ 为测量水听器的输出开路电压(V); $M$ 为测量水听器的自由场接收灵敏度(V/Pa); $p_{ref}$ 为参考基准声压值, $p_{ref}=1$  μPa; $r$ 为测量水听器到声源等效声中心的直线距离(m)。

试验中,采用水听器Reson TC-4014作为测量水听器,将其洗净后放入水池中并达到温度、静压力平衡后,通过升降装置调整其高度使其处于待检换能器的声轴方向上进行测量。由于本次试验中SES-2000 SBP的辐射声信号中包含多种有效频率成分,而对于不同的频率,测量水听器对应不同的接收灵敏度和测量开路电压,因此应根据信号频率分别计算声源级。通过频域滤波处理后,分别计算了总信号声源级、主频信号声源级和差频信号声源级,结果见表2。

表2 SES-2000 SBP声学参数测量结果  
Table 2 Measurement results of acoustic parameters of SES-2000 SBP

试验编号	总声源级 /dB	主频声源级 /dB	差频声源级 /dB	主频1频率 /kHz	主频2频率 /kHz	差频频率 /kHz	脉冲长度 /μs
1	220.788 1	222.624 4	201.020 6	102.147 1	/	3.493 8	226.5
2	220.790 4	222.601 1	201.224 2	100.340 9	96.192 2	3.578 0	466.5
3	220.786 3	222.733 3	197.043 2	101.879 3	/	7.255 5	120.5
4	220.788 2	222.804 5	201.627 6	105.587 6	98.932 2	7.631 6	251.5
5	220.788 3	222.741 6	202.016 6	105.840 9	98.826 7	7.647 8	374.0
6	220.790 6	222.786 7	201.344 6	106.144 7	98.742 4	7.636 7	505.5
7	220.784 8	222.938 2	194.283 0	101.775 4	/	10.746 3	80.5
8	220.785 6	223.050 4	201.287 1	107.586 8	97.184 1	12.863 9	155.5
9	220.786 2	223.130 0	202.572 5	108.148 7	96.394 1	12.697 9	237.5
10	220.785 7	223.148 7	202.355 7	108.473 3	96.384 1	12.630 5	311.5
11	220.787 4	223.201 3	201.516 3	108.409 1	96.193 9	12.511 6	393.5
12	220.783 5	223.004 1	192.527 3	100.762 9	/	14.031 5	71.5
13	220.784 1	223.237 5	198.696 0	108.063 3	96.385 2	14.114 9	136.0
14	220.784 5	223.353 0	201.583 6	108.759 1	95.613 9	14.222 1	208.5
15	220.786 1	223.303 1	202.008 0	109.077 5	95.527 6	14.374 4	272.5
16	220.786 2	223.289 6	201.536 7	109.261 7	95.299 6	14.361 9	368.8

注:“/”表示无数据

#### 4.4.2 频率

采用数字示波器对时域滤波后的稳态部分数据进行分析即可求得其实际频率,但对于参量阵浅地层剖面仪来说,其频率成分较复杂,建议采用频域滤波处理后采用频率分析分别求取其2个主频和1个差频的实际频率值(图4d和图4f)。本次试验不同浅地层剖面仪发射参数设置下测得的频率值见表2。

#### 4.4.3 脉冲长度

脉冲声信号一般可分为输入暂态、稳态和余尾暂态三个阶段<sup>[15]</sup>,根据时域滤波后的稳态部分数据可直接读取脉冲长度,但前提是要能准确判断信号稳态部分的范围。如图5所示,SES-2000 SBP的声脉冲信号从输入暂态到稳态所需的时间很短,从稳态到余尾暂态的时间相对较长。为了计算时采用统一的判断标准,可采用振幅检测法对信号的稳态部分进行界定:从输入端开始,当振幅 $A'$ 达到信号最大振幅 $A_m$ 的 $n\%$ ( $n=10,50$ 或 $90$ )时确定为稳态部分的起点;从输出端开始,当振幅 $A'$ 达到信号最大振幅 $A_m$ 的 $n\%$ 时确定为稳态部分的终点,则稳态部分的时间长度即为脉冲长度。由本试验结果可知, $n$ 为 $50$ 时确定的脉冲长度是合理的。由图5可知,按照 $50\%$ 界定标准,稳态信号的起点为 $1.9995\text{ ms}$ ,终点为 $2.3930\text{ ms}$ ,脉冲长度为 $0.3935\text{ ms}$ 。本试验不同发射参数设置下测得的脉冲长度见表2。

## 5 符合性分析

本试验所用的SES-2000 SBP操作手册对声源级笼统地描述为“大于 $239\text{ dB}$ ”,但并未具体指明是主频信号还是差频信号,本文在分析时只将其用标称声源级进行表述。从表2和图6各种设置下的试验结果可知,总信号声源级和主频信号声源级都较稳定,随发射参数的调节变化不大,主频信号声源级最大,约为 $223\text{ dB}$ ,但比标称声源级低约 $16\text{ dB}$ ;总信号声源级次之,与主频信号声源级相差不大,约为 $221\text{ dB}$ ;差频信号声源级最小,约为 $200\text{ dB}$ ,单周期(cycle)信号的声源级比同组多周期信号的明显偏低。

SES-2000 SBP操作手册对主频频率笼统地描述为“大约 $100\text{ kHz}$ ”,在分析时将其用主频频率标称值来表述,但实际上其主频应该有2个大小相近的约为 $100\text{ kHz}$ 的频率,并以此形成差频。但从表2各种情况的试验结果可知,多周期信号的主频都符合预期,检测到2个频率,而单周期信号的主频却只检测到1个,原因未知。如图7所示,试验所得的主频频率为 $95\sim110\text{ kHz}$ ,对应的2个主频分别在 $100\text{ kHz}$ 的两边,两者的差值与对应差频频率不能准确吻合,但相差不大。操作手册对差频频率的描述为“ $4,5,6,8,10,12$ 和 $15\text{ kHz}$ ,用户可调”,本次试验以其中的4个频率( $4,8,12$ 和 $15\text{ kHz}$ )为例进行说明。从表2和图8各种情况的试验结果来看,各信号的差频频率与对应的标称值并不一致,但较接近;此外,值得注意的是,单周期信号也存在异常,比同频率多周期信号的差频频率明显偏低。

试验中SES-2000 SBP各种情况的信号脉冲长度标称值见表1,每种频率下脉冲长度根据所选信号的周期数与单周期信号的脉冲长度呈现倍数关系。由表2和图9的试验结果可知,在统一的信号稳态判断标准( $50\%$ )下,各信号的实测脉冲长度与标称值基本相符,偏差不大。 $4\text{ kHz}$ 的2种信号脉冲长度比标称值的偏差相对稍大,分别偏小 $23.5$ 和 $33.5\text{ }\mu\text{s}$ ; $8\text{ kHz}$ 的4种信号和 $15\text{ kHz}$ 的5种信号的脉冲长度与标称值偏差微小; $12\text{ kHz}$ 的5种信号的脉冲长度比标称值分别偏小 $2.5,11.5,12.5,21.5$ 和 $23.5\text{ }\mu\text{s}$ 。

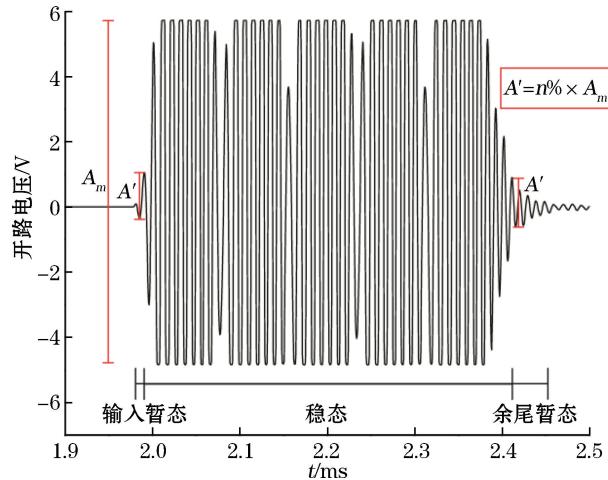


图5 脉冲信号稳态部分的界定

Fig.5 Definition of steady-state part of acoustic pulse

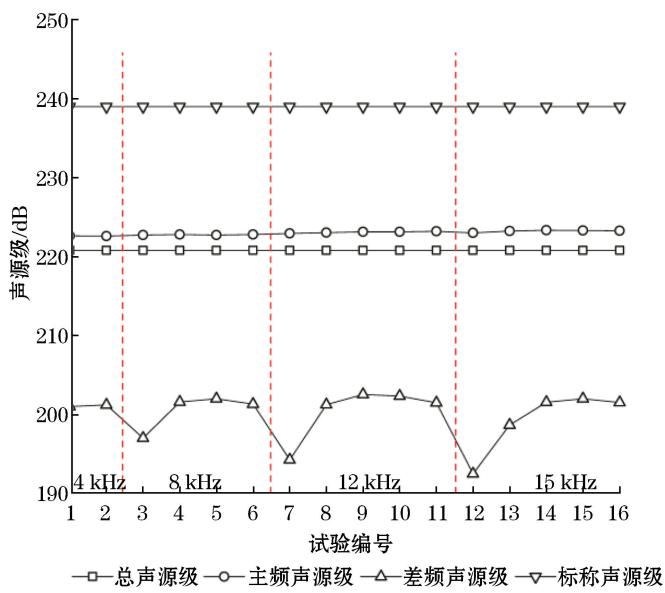


图 6 实测声源级与标称值的比较

Fig.6 Comparison of measured sound source levels with nominal values

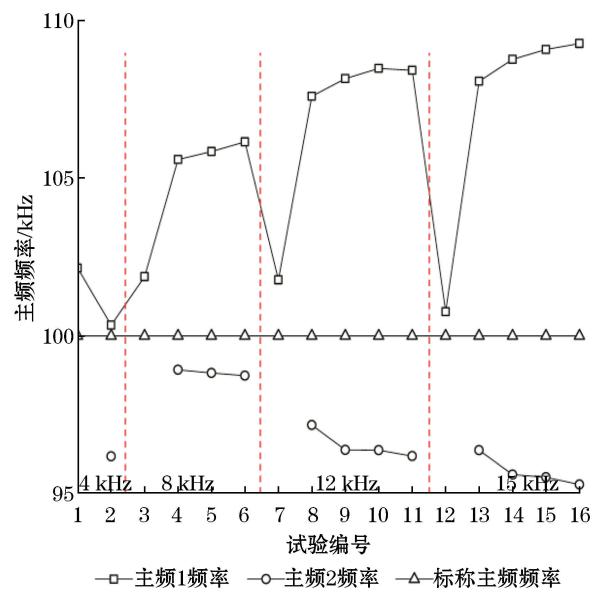


图 7 主频信号的实测频率与标称值的比较

Fig.7 Comparison of measured primary frequencies with nominal values

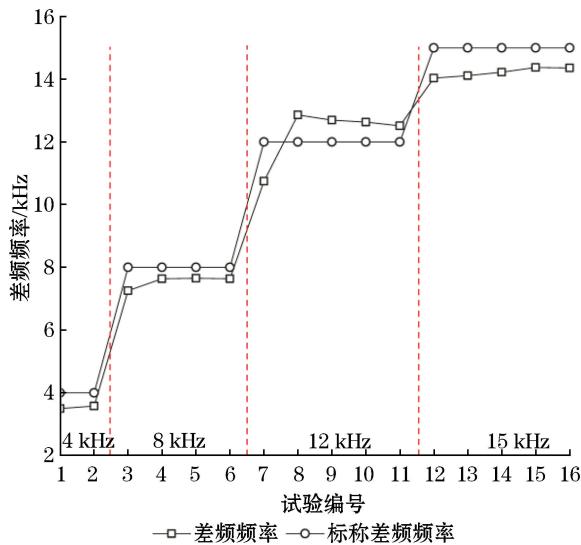


图 8 差频信号的实测频率与标称值的比较

Fig.8 Comparison of measured secondary frequencies with nominal values

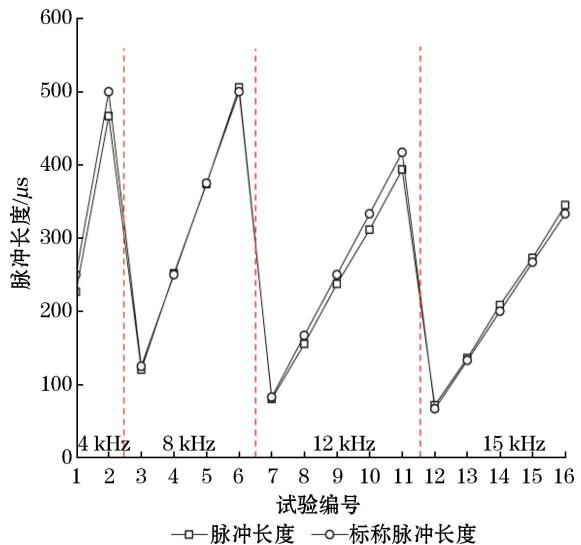


图 9 实测脉冲长度与标称值的比较

Fig.9 Comparison of measured pulse lengths with nominal values

通过对对比分析声源级、频率和脉冲长度三个声学参数的实测值与标称值发现,SES-2000 SBP 操作手册中只有脉冲长度给出的标称值是准确的数值,而且应该是理论值,而声源级和频率仅为参考性的数值,尤其是频率,手册给出的只是大致的整数值,与实测值并不相符。因此,在实施浅地层剖面仪的检测与校准工作时,应对新购的仪器进行检测以获取其初始的技术性能参数作为本底值。

## 6 结 语

科学有效的声学参数准确测量方案是实现浅地层剖面仪检测与校准的第一步。本文以 SES-2000 SBP 为例,针对声源级、频率和脉冲长度三个声学参数,详细地论述了浅地层剖面仪声学参数检测与评价的完整解决方案。此方案包括:由消声水池、精密回旋装置、水听器升降装置、回旋控制设备和测量记录设备组成的检测平台构建;声学参数测量的流程设计和操作要点;测量数据的滤波处理和参数计算方法;测量结果的符合性评价四部分内容,可为开展此类仪器设备的强制性检定的标准制定和实施提供技术性指导和借鉴。

本研究发现 SES-2000 SBP 仪器操作手册给出的声学性能参数并不是准确的数值,而只是参考值。换能器发射的信号同时包含主频信号和差频信号,可分别计算总信号声源级、主频信号声源级和差频信号声源级,本次试验测得的 3 种信号的声源级都比标称值明显偏小。辐射信号中应包含 2 个主频和 1 个差频,意外的是单周期信号的主频却只检测到 1 个,且实测值为 95~110 kHz,与标称值 100 kHz 不相符;实测的差频频率与对应的标称值也不一致,但较接近。操作手册给出的脉冲长度标称值应是理论值,各信号的实测脉冲长度与标称值基本相符,偏差不大。总而言之,试验所用的 SES-2000 SBP 的声源级、频率和脉冲长度的标称值都不是准确的实测值,可能仅为参考值或理论值,对于其他类型的仪器可能也是如此。因此,在实施浅地层剖面仪的检测与校准工作时,对新购仪器进行强制性的首检以获取其技术性能参数的初始值尤为重要。

## 参考文献(References):

- [1] JIN X L. The development of technique of marine geophysics[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 6-13. 金翔龙. 海洋地球物理技术的发展[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2004, 27(1): 6-13.
- [2] BULL J, GUTOWSKI M, DIX J, et al. 3D chirp sub-bottom imaging system: design and first 3D volume[C]// Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, 2005: 1-6.
- [3] VARDY M E, DIX J K, HENSTOCK T J, et al. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: a case study in small-object detection[J]. Geophysics, 2008, 73(2): 33-40.
- [4] WANG F Q, ZHOU X H, DING J S, et al. Acoustic parameter test and detection performance evaluation methods of sub-bottom profiler and side-scan sonar[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 559-567. 王方旗, 周兴华, 丁继胜, 等. 浅地层剖面仪和侧扫声呐仪器检测与评价方法研究[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 559-567.
- [5] ZHAO T H. Submarine high-resolution acoustic detection and the application[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. 赵铁虎. 海底高分辨率声学探测及其应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [6] National Standardization Technical Committee on Acoustics. Acoustics: free-field calibration method of under water acoustic transducer: GB/T 3223—1994[S]. Beijing: China Standards Press, 1994. 全国声学标准化技术委员会. 声学: 水声换能器自由场校准方法: GB/T 3223—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [7] National Standardization Technical Committee on Acoustics. Acoustics: measurement of underwater sound transducers: GB/T 7965—2002[S]. Beijing: China Standards Press. 全国声学标准化技术委员会. 声学: 水声换能器测量: GB/T 7965—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] WANG F Q, DONG L F, DING J S, et al. An experiment of the actual vertical resolution of the sub-bottom profiler in an anechoic tank [J]. Archives of Acoustics, 2019, 44(1): 185-194.
- [9] WANG Q, LIU Y C, BAO J Y. An analysis of vertical resolving power for subbottom profiler[J]. Marine Science, 2003, 27(1): 77-80. 王琪, 刘雁春, 暴景阳. 浅剖仪垂直探测分辨率分析[J]. 海洋科学, 2003, 27(1): 77-80.
- [10] WANG F Q. The research of the application and data interpretation of sub-bottom profiler[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2010. 王方旗. 浅地层剖面仪的应用及资料解译研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.
- [11] LI X R, LI Y Q, ZHANG S. The LabView implement of synchronization overlapping average algorithm to suppress noise[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(4): 73-76. 李星蓉, 李永倩, 张硕. 同步叠加平均算法抑制噪声的 Labview 实现[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(4): 73-76.
- [12] National Standardization Technical Committee on Acoustics. Preferred frequencies for the acoustic measurement: GB 3240—1982[S].

Beijing: China Standards Press. 全国声学标准化技术委员会. 声学测量中的常用频率: GB 3240—1982[S]. 北京: 中国标准出版社, 1982.

[13] LIU B S, LEI J Y. Underwater acoustics principle[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993. 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.

[14] ZHEN S J, YUAN W J, MIU R X, et al. Underwater acoustic measurement technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995. 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴, 等. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995.

[15] LIU Y C, YANG F L, LI Q Q, et al. A method for detecting acoustical index of single-beam echosounders[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2015, 35(6): 69-72. 柳义成, 阳凡林, 李倩倩, 等. 单波束测深仪声学指标的检测方法[J]. 海洋测绘, 2015, 35(6): 69-72.

## Research on Measurement Technique of Acoustic Parameters of Sub-bottom Profiler

WANG Fang-qi<sup>1</sup>, ZHOU Xing-hua<sup>1,2</sup>, LIN Xu-bo<sup>1</sup>, TAO Chang-fei<sup>1</sup>,

CUI Li<sup>1</sup>, DING Ji-sheng<sup>1</sup>, LIANG Guan-hui<sup>1</sup>, DONG Li-feng<sup>1</sup>

( 1. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China )

**Abstract:** Based on a test for measuring acoustic parameters of a parametric sub-bottom profiler (SBP) in an anechoic tank and subsequent data processing and analysis, this study presented a complete exploratory solution for the measurement and evaluation of key acoustic parameters of SBP. The scheme mainly included four parts, 1) Construction of the measurement platform, which includes briefly describing main components of the platform and putting forward basic technical requirements for the construction of the anechoic tank; 2) Measurement of acoustic parameters, providing methods and operating points of the measurement of the sound source level, frequency and pulse length; 3) Data processing and analysis, which includes discussions on purposes and methods of data preprocessing and providing main formulas and methods for calculating acoustic parameters; 4) Conformity analysis, which analyzes the conformities and deviations between measured and nominal values of acoustic parameters. We suggested that the nominal values of acoustic parameters of SBP used in this test were only reference values or theoretical values. Therefore, it is important to carry out the mandatory first measurement for newly purchased instrument to obtain the initial values of the parameters.

**Key words:** sub-bottom profiler; acoustic parameter; sound source level; frequency; pulse length

**Received:** August 30, 2019