

浅地层剖面仪和侧扫声呐仪器检测 与评价方法研究

王方旗,周兴华,丁继胜,林旭波,董立峰,陶常飞,

梁冠辉,刘敦武,吕京福,崔 力

(国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

摘 要:针对浅地层剖面仪和侧扫声呐这 2 种声呐系统探讨性地提出了“两步法”的性能检测和评价方法:1)声学物理参数检测:分析了与浅地层剖面仪和侧扫声呐系统性能相关的关键声学物理参数(声源级、频率/频谱、脉冲长度、波束角或开角),并提出了在消声水池中测定这些参数的方法;2)实际探测性能评价:分析了与浅地层剖面仪和侧扫声呐系统性能相关的实际探测效果评价指标,并提出了通过海上试验来检测和评价这些指标的方法。最后对建设具备高效消声性能的大型试验水池,建设海底标准地层检测场和海底标准目标物检测场以真正实现设备性能的检定应做的后续工作进行了讨论。

关键词:浅地层剖面仪;侧扫声呐;声学参数;性能评价

中图分类号:P715

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2017)04-0559-09

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.012

单波束测深仪(Single-beam Echosounder, SBE)、多波束测深仪(Multi-beam Echosounder, MBE)、浅地层剖面仪(Sub-bottom Profiler, SBP)和侧扫声呐(Side-scan Sonar, SSS)都是基于声学原理研发的用于探测海底地形地貌和浅部地层结构、构造的地球物理仪器^[1-2]。近年来,随着我国近海油气资源的大规模开发、国土资源大调查的开展、各种海洋工程建设的不断增加以及各种海底灾害地质事件的频繁发生,浅地层剖面仪和侧扫声呐等声学系统被国内诸多单位大量引进,得到了广泛应用,发挥了巨大的作用^[3-9]。

由于缺乏相关系统性能检测的方法体系和相应的测试设施,常用的声呐设备无法进行规范有效的检测,只能采取自校和比测的方法,且无统一规范,缺少基本的系统运行质量评价程序。这将导致获取的数据资料精度不高,影响探测结果的准确性和可靠性。因此,我们希望通过研究这些常用海底声呐系统性能检测的关键技术和方法,建立科学的检测和检定体系,保证系统的有效性、稳定性和可靠性,确保探测数据的准确性和可信度,以提升我国海底调查资料的质量和使用价值。

我们提出了浅地层剖面仪和侧扫声呐两种系统的声学物理参数测定和探测性能评价的方法体系,为以后开展此类仪器设备的检测及强制性检定的标准制定和实施提供技术性指导和借鉴。

1 基本方案

国内外海底声呐系统产品多样,其核心技术不同,因此目前国内正在广泛使用的声呐系统型号不一。海底声呐系统常用的技术主要有 4 种: CW 波声源(连续波)、Chirp 波声源(调频)、相干声源(参量阵)和合成孔

收稿日期:2016-09-01

资助项目:海洋公益性行业科研专项——常用海底声呐测量仪器计量检测关键技术与示范应用(201305034); 国家自然科学基金青年基金项目——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)

作者简介:王方旗(1981-),男,山东诸城人,工程师,硕士,主要从事海洋地球物理调查技术方面研究。E-mail: sdhdfwq0317@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

径,系统的声波激发原理不同,其声学物理参数也不同,信号采样率也会有差异。

基于以上两点,认为将所有的浅地层剖面仪或侧扫声呐一概而论制定统一的检测标准是不可行的;但是,从系统本身的性能和功能来考虑,则可以制定一套统一的基本方法体系来指导具体的检测和评测工作。本文针对浅地层剖面仪和侧扫声呐提出了“两步法”的系统性能检测和评价方法体系(图 1),分为两步:声学物理参数测定和实际探测性能评价。

2.1 声学物理参数测定

厂商标称的声学物理参数是支撑系统能达到其设计探测目标的基本数据。因此,评价一套声呐系统是否达到其标称的性能和效果,首先需对其主要的声学物理参数进行测定。浅地层剖面仪和侧扫声呐的主要声学物理参数及其对系统的主要影响见表 1。

表 1 声学物理参数对系统的影响

Table 1 The influence of acoustic parameters on the instrument

系 统	声学参数					
	声源级	频率/频谱	脉冲长度	波束角	水平开角	垂直开角
浅地层剖面仪	穿透深度、垂直分辨率	穿透深度、垂直分辨率	穿透深度、垂直分辨率	垂直分辨率、水平分辨率	N/A	N/A
侧扫声呐	有效量程	有效量程、横向分辨率	量程分辨率	N/A	横向分辨率	有效量程

注:N/A 表示该项不适用

2.2 实际探测性能评价

浅地层剖面仪和侧扫声呐探测的最终成果来自对海上调查所采集的声学资料的处理。目前的技术已实现了图像的数字化采集,允许用户将探测资料带回室内进行更为详细的处理和分析,但在海上采集时,选择合适的系统参数组合和获取最佳声学图像仍然是非常重要的^[10-12]。评价浅地层剖面仪和侧扫声呐海上作业时数据质量效果的主要指标:信噪比、信混比、检测力、垂直分辨率、水平分辨率、横向分辨率、量程分辨率、穿透深度和有效量程(表 2)。由于声呐系统设备厂商、规格型号及适用范围的不同,表 2 中的评价指标无法给出一个定量的标准数值(大于这个数值评价为合格,小于这个数值评价为不合格)。

表 2 实际探测性能评价指标

Table 2 The actual detection performance evaluation indexes

系 统	评价指标								
	信噪比	信混比	检测力	垂直分辨率	水平分辨率	横向分辨率	量程分辨率	穿透深度	有效量程
浅地层剖面仪	越高越好	越高越好	N/A	越高越好	越高越好	N/A	N/A	越深越好	N/A
侧扫声呐	越高越好	N/A	越高越好	N/A	N/A	越高越好	越高越好	N/A	越大越好

注:N/A 表示该项不适用

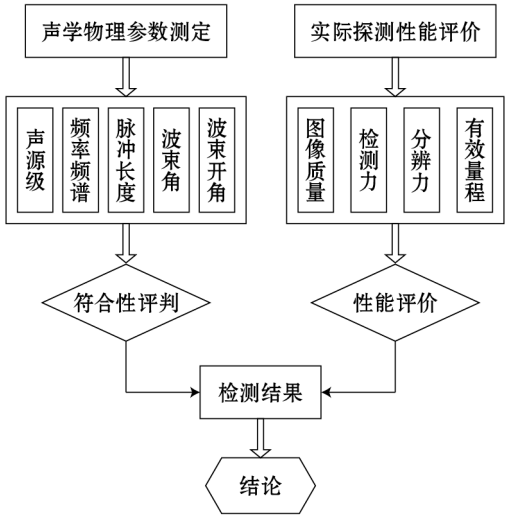


图 1 声呐系统性能检测流程图
Fig.1 The flow chart of performance test of sonar

3 方法体系

国家海洋局第一海洋研究所与山东科技大学联合进行了海底声呐系统性能检测关键技术的研究,本文主要介绍浅地层剖面仪和侧扫声呐系统性能检测和评价的方法体系。

3.1 声学物理参数测定

3.1.1 检测平台设计

检测平台主要由 5 部分组成: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(图 2)。检测平台建设是声学参数测量最基础和最关键的一步,必须满足相关的标准和规范^[13-15]。消声水池的大小主要决定于声波频段、声基阵的最大线度和消声材料的性能,需形成自由声场环境,且保证被检换能器与检测水听器间的距离满足远场条件,所使用的消声材料应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铺设消声材料,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波发射方向,要求旋转角度的精度控制要高,满足小角度等角旋转的要求,实现被检换能器水平方向波束角(开角)的测量;水听器升降装置用于调整水听器的垂直高度,实现被检换能器垂直方向波束角(开角)的测量;回旋控制和测量记录设备分别用于控制回旋装置的旋转和测量、记录检测结果。

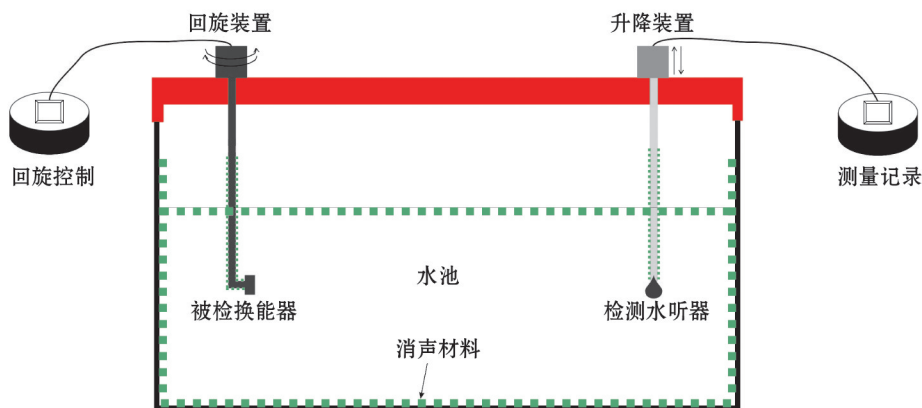


图 2 声学参数检测平台示意图

Fig.2 The schematic diagram of testing platform for acoustic parameters

3.1.2 检测设备的电噪声测量和采样率确定

电噪声是由于电磁场交替变化而引起某些机械部件或空间容积振动而产生的噪声,实际是一种幅度较小的交流电压,从波形上可以分为 3 类:放大器产生的频率和形状均无规律的杂散波形、线性电源产生的频率为 50 或 100 Hz 的正弦波和开关电源等产生的频率几十到几百 kHz 的方波。声呐系统的声学物理参数测定在消声水池中进行,已大大降低了环境噪声的影响,影响测量的噪声主要是检测设备自身的电噪声,因此在对各参数进行测定之前需对设备的电噪声进行评测。实际测试时,可将电噪声与背景噪声同时进行评测,即在待检声呐不发射的情况下直接接收信号,通过处理和分析接收到的数据进行噪声评价。

海底声呐系统的频率范围很宽,浅地层剖面仪的频率为几百 Hz 至十几 kHz,侧扫声呐的频率为几百 kHz 甚至上千 kHz。根据采样定理(奈奎斯特理论),只有采样频率高于原始信号最高频率的两倍时,才能把数字信号表示的信号还原成为原来信号。因此在进行声学参数测定时,声波采集器的采样率需依据待检声呐系统的频带范围进行确定,确保不失真;此外,为了获取较高的测量精度,所使用的采集卡的位数应至少 16 位。

3.1.3 浅地层剖面仪的声学物理参数

浅地层剖面仪需检测的主要声学物理参数:声源级、频率或频谱、脉冲长度和波束角。测定声学参数前首先需确定换能器的等效声学中心。对于指向型声源而言,在波束角测定过程中通过研究辐射声场的声压幅值的变化规律就可以确定等效声学中心。实际检测时应调整系统参数组合,对每个声学参数进行重复测量。

1)波束角:对于指向型声源存在波束角的概念,波束角影响浅地层剖面仪的分辨力。波束角测定依据国家标准《声学-水声换能器测量》^[15]进行。

2)声源级:是描述声呐发射的声信号强弱的物理量,其定义为在发射器辐射声场中,声轴方向上离声源1 m处的声强与参考声强之比的分贝数^[16]。将被检换能器的声中心对准水听器后,将采集到的声压幅值数据代入到声呐方程中计算声源级^[17]。

3)频率/频谱:对采集到的脉冲信号的稳态部分数据进行频谱分析,获取发射信号的频谱,并分析信号的各个频率成分和频率分布范围,求取各个频率成分的幅值分布和能量分布,从而得到主要幅度和能量分布的频率值。

4)脉冲长度:根据采集到的脉冲信号的稳态部分数据直接读取脉冲长度。

3.1.4 侧扫声呐的声学物理参数

侧扫声呐需检测的主要声学参数:声源级、频率或频谱、脉冲长度、水平开角和垂直开角。与浅地层剖面仪的声学参数检测一样,首先也需确定侧扫声呐换能器的等效声学中心,在测量水平开角和垂直开角过程中,可以将其等效声学中心确定。由于侧扫声呐的换能器是对称分布的,在检测时应应对两侧换能器分别单独进行测量。

1)水平开角和垂直开角:侧扫声呐的水平开角影响其横向分辨力,一般很小,而垂直开角影响量程,一般很大。水平开角和垂直开角的测定参照浅地层剖面仪波束角的测定方法进行。

2)声源级、频率或频谱、脉冲长度的检测与浅地层剖面仪的检测方法一致。

3.1.5 声学物理参数符合性评价

声学物理参数的测量在消声水池中进行,水的温度和密度影响声速,从而会对各声学参数的测量产生影响,因此,应根据实测的水的温度和密度对各声学参数的测量值进行修正。

将修正后的声学物理参数测量值与系统厂商标称值进行比对,做出符合性评价:如果是新采购系统,则分析其测量值是否与标称值相符合,以此评判该系统是否能够达到设计要求;如果是已有系统,关注的则是系统经过长时间使用后是否由于元器件磨损、老化等原因导致声学参数发生变化,并评判系统声学参数发生变化后能否继续使用以及能否达到探测的相关技术要求。

3.2 实际探测性能评价

进行海底声呐系统性能检测的目的是保证系统的有效性、稳定性和可靠性,确保探测数据的准确性和可信度,因此对测试设备再实施海上探测试验是一项必需的程序,评测结果应当作为被检系统能否满足继续使用条件的重要判据。考虑到海洋环境的不可重复性,在检测时可采用同类型的合格仪器进行同步探测,作为参考。

3.2.1 浅地层剖面仪探测性能

浅地层剖面仪海上探测性能评价依赖于获取的声学剖面图像的质量,主要评价指标有:信噪比、信混比、垂直分辨力、水平分辨力和有效穿透深度。测试时选择的地层条件对系统的实际探测效果有重要影响。对于中、高频指向型声源的浅地层剖面仪而言,可在消声水池中建设标准地层检测场进行检测(图3),但对于低频声源和球面波声源来说,则必须选择具有代表性地层的典型开阔水域进行检测。试验时应设置多组系统参数组合分别进行检测。

1)信噪比:回声信号有效功率与噪声有效功率的比率,是影响声学剖面图像可读性的重要指标。信噪比

的高低可采取 2 种评价方法:(1)设定临界值,采用公式计算实际声图的信噪比进行评判^[11]; (2)直接对声图进行判读,若地层界面清晰可见,背景“雪花”型杂波较弱可评判为信噪比高,反之,“雪花”型杂波掩盖了地层界面或严重影响地层界面的划分则评判为低。

2)信混比:回声信号有效功率与海底混响有效功率的比率,球面波声源、浅水区和较“硬”的海底容易出现混响,特别是水深较浅时海底混响对剖面图像的影响较大。信混比的高低主要与选择的测试水域有关,不作为判定系统性能的依据。

3)垂直分辨力:能够分辨的最薄地层的厚度,浅地层剖面仪的理论垂直分辨力主要由脉冲长度决定^[18-19],但影响实际垂直分辨力的因素很多。如图 3,建立 B 处示意的“楔形”地层进行垂直分辨力的检测:被检系统从左向右进行连续探测,记录剖面上会形成从无到有并逐渐变厚的层序 I 的连续剖面,由此可得到被检浅地层剖面仪的实际垂直分辨力 $\Delta h_{\min}$ 。实际检测时,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数,用正演的方法计算垂直分辨力标准值 $\sigma h_{\min}$,然后将垂直分辨力测量值 $\Delta h_{\min}$ 与标准值 $\sigma h_{\min}$ 相比较,评判被检系统垂直分辨力的偏差。

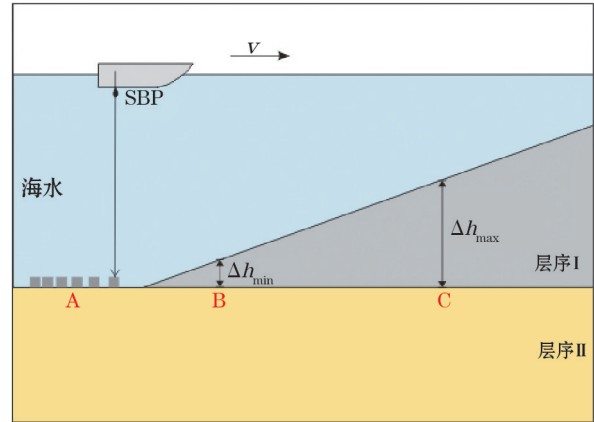


图 3 浅地层剖面仪实际效果检测场模型
Fig.3 Actual effect detection field model for sub-bottom profiler

4)水平分辨力:能区分开 2 个目标物的最小间距,即声波在海底形成的“脚印”的尺寸,主要由指向型换能器的波束角和水深决定。如图 3 中 A 处所示,通过在海底安放距离连续变化的一系列目标物可以实现实际水平分辨力 $\Delta l_{\min}$ 的检测。实际检测时,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数,用正演的方法计算水平分辨力标准值 $\sigma l_{\min}$;将水平分辨力测量值 $\Delta l_{\min}$ 与标准值 $\sigma l_{\min}$ 相比较,评判被检系统水平分辨力的偏差。

5)有效穿透深度:与系统性能和海底地质条件有关,因此建立标准地层检测场对浅地层剖面仪实际穿透深度的检测来说具有重要的意义。如图 3 中 C 处,采用地层厚度逐渐变厚的方法进行系统的有效穿透深度检测:随着系统从左向右连续探测,层序 I 的厚度逐渐增加,如果当厚度增加到大于 $\Delta h_{\max}$ 时,恰好接收不到层序 I 与层序 II 间界面的有效反射信号,那么 $\Delta h_{\max}$ 就可判定为被检系统在此地质条件下的有效穿透深度。实际检测时,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数,用正演的方法计算穿透深度标准值 $\sigma h_{\max}$;然后将有效穿透深度测量值 $\Delta h_{\max}$ 与标准值 $\sigma h_{\max}$ 相比较,评判被检系统有效穿透深度的偏差。

3.2.2 侧扫声呐探测性能

侧扫声呐实际探测性能的评价依据是声学回波图像质量,主要评价指标:信噪比、检测力、横向分辨力、量程分辨力和有效量程。实践中很难找到满足要求的天然海底来检测侧扫声呐的实际分辨力等参数,因此需人工制做典型的目标物安置于海底进行检测。

1)信噪比:与浅地层剖面仪的评测方法一致,不再赘述。

2)检测力:能够检测到的目标物的最小尺寸,这个尺寸越小,侧扫声呐的检测力越高。采用图 4 所示的方法(布设于海底的直径均匀变化的管状目标物)测定被检测侧扫声呐的实际检测力。检测力的高低受侧扫声呐拖鱼距海底高度和测量船速度的影响较大,实测时需调整这 2 个参数分别进行测定。

3)横向分辨力:能在记录图像上清晰地显现出两个影像的两个平行于测线方向上的物体之间的最小距离,它是声波传播到海底某个点处的波束宽度。采用图 5 所示的方法(在海底测线方向上布设距离依次增加的一系列目标物)检测侧扫声呐的实际横向分辨力。横向分辨力受侧扫声呐的水平波束开角、脉冲发射间隔和测量船速度的影响较大,需调整这 3 个参数分别进行测定。实际检测中,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数等,用正演的方法计算每种参数组合时的横向分辨力标准值,然后与对应的测量值进行比较,分别评判被检系统在各种配置参数时的横向分辨力的偏差。

4) 量程分辨力:能在记录图像上清晰地显现出两个影像的量程方向上的两个物体之间的最小距离。采用图 6 所示的方法(在海底量程方向上布设距离依次增加的一系列目标物)检测侧扫声呐的实际量程分辨力。量程分辨力受侧扫声呐频率、脉冲长度、拖鱼距海底高度和测量船速度的影响较大,实测时需调整这 4 个参数分别进行测定;实际检测中,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数等,用正演的方法计算每种参数组合时的量程分辨力标准值,然后与对应的测量值进行比较,分别评判被检系统在各种配置参数时的量程分辨力的偏差。

5) 有效量程:侧扫声呐实际工作时,当我们设定一个量程(单侧扫宽) L 后,有时并不是量程范围内的回波信号都是有效的,很多时候在水平方向上距离拖鱼 $L_{\max} (< L)$ 以外的回波接收不到,这个 $L_{\max}$ 即为其有效量程。采用图 7 所示的方法(在海底布设与测线方向呈一定角度的柱状或管状目标物)可以检测侧扫声呐的有效量程。有效量程受侧扫声呐拖鱼距海底高度、发射间隔和测量船速度的影响较大,实测时需调整这 3 个参数分别进行测定。实际检测中,首先根据实测的系统声学参数和测试环境参数等,用正演的方法计算每种参数组合时的有效量程标准值,然后与对应的测量值进行比较,分别评判被检系统在各种配置参数时的有效量程的偏差。

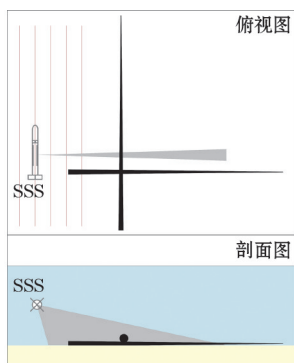


图 4 侧扫声呐的检测力测定方法

Fig.4 The measurement method for detection capability of side-scan sonar

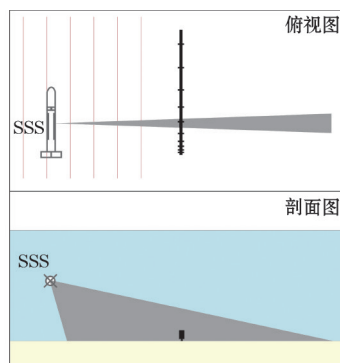


图 5 侧扫声呐的横向分辨力检测方法

Fig.5 The measurement method for lateral resolution of side-scan sonar

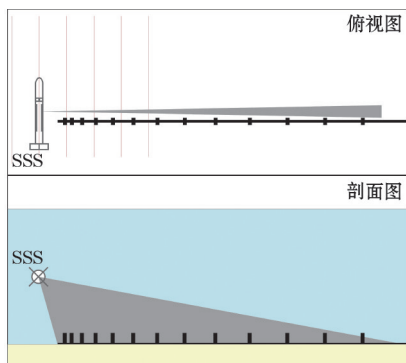


图 6 侧扫声呐的量程分辨力检测方法

Fig.6 The measurement method for range resolution of side-scan sonar

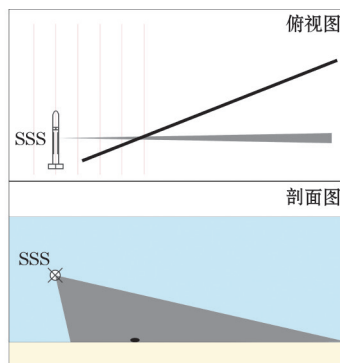


图 7 侧扫声呐的有效量程检测方法

Fig.7 The measurement method for effective range of side-scan sonar

3.2.3 实际探测性能评价

实际探测性能测试完成后,根据获取的声学图像的信噪比、信混比、垂直分辨力、水平分辨力、有效穿透深度、检测力、横向分辨力、量程分辨力和有效量程等指标数据及相关指标测量值与正演计算标准值的比较

结果对被检系统进行综合评价。

4 结 语

4.1 讨 论

针对浅地层剖面仪和侧扫声呐两种海底声呐系统探讨性地提出了“两步法”的仪器设备检测和评价方法,即:声学物理参数测定和实际探测性能评价,并进行了系统地阐述,但还存在一些问题:

1)准确地测定声呐系统的声学物理参数,需要建设具备高效消声性能的大型试验水池,并配备高精度的集精密回旋装置、水听器升降装置、控制设备和测量记录设备等一体的海底声呐设备声学物理参数测定平台;

2)在消声水池中测定低频、非指向型声源(如电火花)的声学物理参数难度很大,可能无法实现,需寻求其他补充方法;

3)在海上进行声呐系统的实际探测性能评测时,影响因素很多,由于海洋环境变化、测量船不同、操作人员不同等导致的检测结果可能会不一致,因此需预先编制标准化和规范化的海上检测操作流程,最大限度地排除外界干扰,确保得到可信的结果。

4.2 展 望

海底声呐系统的设备参数检测和探测性能评价是一项涉及多种学科的工作,意义重大。在后续工作中主要针对以下几个方面进行:首先,选取某一典型的水域,建设海上标准地层检测场用于检测和评价浅地层剖面仪的实际探测性能,建设海底标准目标物检测场用于检测和评价侧扫声呐的实际探测性能;其次,进行多次消声水池试验和海上试验,进一步优化和完善浅地层剖面仪和侧扫声呐系统的室内声学物理参数检测 and 实际探测性能评价方法;再次,积极推动相关部门出台相应的国家标准和规范,建立科学的、权威的海底声呐系统校准、检测和检定体系,促进我国海洋产业的持续和健康发展。

致谢:山东科技大学测绘科学与工程学院阳凡林教授在消声水池声呐试验中提供了支持和帮助;中国海洋大学海洋地球科学学院曹立华教授对本文提出了宝贵的修改意见。

参考文献(References):

- [1] LIU B H, DING J S, PEI Y L, et al. Marine geophysical survey techniques and their applications to off shore engineering[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(3): 374-384. 刘保华, 丁继胜, 裴彦良, 等. 海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(3): 374-384.
- [2] ANDERSON N, ALOTAIBI A. Site assessment using echo sounding, side scan sonar and sub-bottom profiling[R]. A National University Transportation Center at Missouri University of Science and Technology, 2014.
- [3] LI S J, TAO C H, CHU F Y, et al. A practical application of sub-bottom profile system to cobalt-rich crust investigation in middle pacific ocean[J]. *Ocean Technology*, 2007, 26(1): 54-57. 李守军, 陶春辉, 初凤友, 等. 浅地层剖面在富钴结壳调查研究中的应用[J]. *海洋技术*, 2007, 26(1): 54-57.
- [4] LI Y B, ZHANG Y F, LIU Y L, et al. Application of subbottom profiler to ocean engineering[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(1): 4-8. 李一保, 张玉芬, 刘玉兰, 等. 浅地层剖面仪在海洋工程中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2007, 4(1): 4-8.
- [5] WANG F Q, HU G H, WU Y T, et al. The acoustic subbottom profile and its interpretation of Jinzhou Bay, Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 128-137. 王方旗, 胡光海, 吴永亨, 等. 渤海金州湾海域声学浅地层剖面及其解释[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 128-137.
- [6] WANG F Q, WU Y T, LIU L J, et al. Application of acoustic subbottom profiling technology to prospect the site of an artificial island in the Jinzhou bay[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(5): 841-848. 王方旗, 吴永亨, 刘乐军, 等. 声学浅地层剖面探测技术在金州湾人工岛场址勘察中的应用[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(5): 841-848.

- [7] LIU L J, FU M Z, LI J G, et al. Geologic hazards in the deep pipeline routing area of the Liwan 3-1 Gas Field in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(2): 162-174. 刘乐军, 傅命佐, 李家钢, 等. 荔湾 3-1 气田海底管道深水段地质灾害特征[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 162-174.
- [8] LIU Z, CAO L H, TONG S Y, et al. Problems of application of high-frequency sub-bottom profiler technology to submarine pipeline inspection[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 66-70. 刘臻, 曹立华, 童思友, 等. 高频浅地层剖面技术在海底管道探测中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(7): 66-70.
- [9] CAO L H, ZHAI K, PU J J, et al. Study on regional distribution pattern of subaqueous shore slope sediment movement in chengdao sea area[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(4): 49-54. 曹立华, 翟科, 蒲进菁, 等. 埕岛海区水下岸坡沉积物不稳定运动的区域差异性[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(4): 49-54.
- [10] ZHAO T H, ZHANG Z X, XU F. Analysis of typical problem for shallow acoustic surveying in the shallow waters[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 24(3): 215-219. 赵铁虎, 张志珣, 许枫. 浅水区浅地层剖面测量典型问题分析[J]. *物探化探计算技术*, 2002, 24(3): 215-219.
- [11] 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.
- [12] DING W F, SU X H, JIANG W J, et al. Solving of several foreign commercial software's bug in sub-bottom profile acquisition[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(1): 119-125. 丁维凤, 苏希华, 蒋维杰, 等. 声学地层剖面野外数据采集几个关键问题的解决[J]. *海洋学报*, 2014, 36(1): 119-125.
- [13] State Bureau of Technical Supervision. Acoustics: Free-field calibration method of underwater acoustic transducer: GB/T 3223—1994 [S]. Beijing: China Standards Press, 1994. 国家技术监督局. 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.
- [14] State Bureau of Technical Supervision. Acoustics: Standard Hydrophone: GB/T 4128-1995[S]. Beijing: China Standards Press, 1995. 国家技术监督局. 声学: 标准水听器: GB/T 4128-1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.C. Acoustics: Measurement of underwater sound transducers: GB/T 7965—2002[S]. Beijing: China Standards Press. 国家质量监督检验检疫总局. 声学: 水声换能器测量: GB/T 7965—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WANG Q, LIY 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力分析[J]. *海洋科学*, 2003, 27(1): 77-80.
- [19] 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.

Acoustic Parameter Test and Detection Performance Evaluation Methods of Sub-bottom Profiler and Side-scan Sonar

WANG Fang-qi, ZHOU Xing-hua, DING Ji-sheng, LIN Xu-bo, DONG Li-feng,
TAO Chang-fei, LIANG Guan-hui, LIU Dun-wu, LÜ Jing-fu, CUI Li
(*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The sub-bottom profiler and side-scan sonar are the most commonly used sonar systems in oceanography field. With the wide application of them, it is vital to promulgate standards and specifications for calibration and testing of such acoustic detecting systems. Based on our practice, the "two-step" detection performance test and evaluation methods are presented for these two kinds of sonar systems. The first step is the APT (acoustic parameter test) which is for the test of acoustic performance parameters of sonar, such as source level, frequency spectrum, pulse length, beam angle, etc. The second step is the DPE (detection performance evaluation) which is for the evaluation of the actual detection performance at sea, such as resolution, penetration depth, effective range, etc. The APT methods and DPE methods for the sub-bottom profiler and side-scan sonar are detailed and respectively discussed. However, in order to test and evaluate the sonar systems accurately, it is necessary to build a large-scale testing pool with highly efficient muffler performance, a test field with standard seabed layers and an underwater detecting field with standard targets.

Key words: sub-bottom profiler; side-scan sonar; acoustic parameter; performance evaluation

Received: September 1, 2016