

浅地层剖面探测综述

李平, 杜军

(国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 海洋地球物理技术在海洋地质调查中起重要作用, 其中浅地层剖面探测因其成本低、效率高, 在海洋地质调查研究中具有广阔的应用前景。浅地层剖面探测是利用声波在水中和水下沉积物内传播和反射的特性来探测海底浅部地层结构和构造的。本文阐述了浅地层剖面仪发展历程, 针对浅地层剖面探测, 分析了其主要影响因素和压制方法, 并对主要剖面声图类型及其特征进行了探讨。

关键词: 地球物理技术; 浅地层剖面探测; 综述

中图分类号: P631.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2011)03-0344-07

Review on the probing of sub-bottom profiler

LI Ping, DU Jun

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Marine geophysical survey technique plays an important role in marine geology investigations, in which Sub-bottom Profiler Probe with the low-cost and high-efficiency characteristic has broad application prospects in the marine geological investigation and research. Sub-bottom Profiler Probe is to use the transmission and reflection of sound waves in the water and underwater sediment to detect the shallow stratum structure under the seabed. In this paper, the development process of Sub-bottom Profile system and its main influencing factors and suppression methods are analyzed. The main audio diagram types and their characteristics are discussed.

Keywords: marine geophysical survey technique; sub-bottom profiler probe; review

浅地层剖面探测是一种基于水声学原理的连续走航式探测水下浅部地层结构和构造的地球物理方法^[1-3]。浅地层剖面仪 (Sub-bottom Profiler System) 又称浅地层地震剖面仪, 是在超宽频海底剖面仪基础上的改进, 是利用声波探测浅地层剖面结构和构造的仪器设备。以声学剖面图形反映浅地层组织结构, 具有很高的分辨率, 能够经济高效地探测海底浅地层剖面结构和构造。

本文简要介绍了浅地层剖面探测技术的工作原理, 总结了目前国内外广泛使用的主要技术产品类型以及主要参数和性能。阐述了浅地层剖面仪发展历程, 分析了影响浅地层剖面探测质量的主要因素和压制方法, 并对主要浅地层剖面声图类型及其特征进行了探讨。

1 浅地层剖面探测发展历程

浅地层剖面仪是在测深仪基础上发展起来的, 只不过其发射频率更低, 声波信号通过水体穿透床底后继续向底床更深层穿透, 结合地质解释, 可以探测到海底以下浅部地层的结构和构造情况。浅地层剖面探测在地层分辨率 (一般为数十厘米) 和地层穿透深度 (一般为近百米) 方面有较高的性能, 并可以任意选择扫频信号组合, 现场实时设计调整工作参量, 可以在航道勘测中测量海底浮泥厚度, 也可以勘测海上油田钻井平台基岩深度。

浅地层剖面仪采用的技术主要包括压电陶瓷式、声参量阵式、电火花式和电磁式 4 种。其中, 压电陶瓷式主要分为固定频率和线性调频 (Chirp)

收稿日期: 2010-3-18; 收修稿日期: 2010-11-2

基金项目: 国家海洋局青年基金 (2010310)。

作者简介: 李平 (1981—), 男, 陕西蓝田, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理调查与研究工作。电子邮箱: lp@fio.org.cn。

两种；电火花式主要利用高电压在海水中的放电产生声音原理；声参量阵式利用差频原理进行水深测量和浅地层剖面勘探；电磁式通常多为各种不同类型的 Boomer，穿透深度及分辨率适中。

浅地层剖面探测设备性能指标中分辨率与穿透深度是互相矛盾的。20 世纪 80 年代，美国 Datasonics 公司与罗德岛州州立大学的海军研究所及美国地质调查局联合开发了一种称为“Chirp”的压缩子波，并被广泛的应用于海底浅地层勘探中^[4]。通过长时间的调频脉冲，接收信号经过滤波处理，得到一个比发射脉宽的宽度窄很多的压缩脉冲，压缩后的脉冲宽度与发射脉冲宽度无关，此压缩脉冲宽度等于调频带宽的倒数，即 $\tau_p=1/\Delta f$ ，（ τ_p ：处理后的脉冲宽度； Δf ：调频宽度）。发射较宽的线性调频（Chirp）脉冲，能够保证一定穿透深度，同时不会降低垂直分辨率。其中 GeoChirp II 是采用线性调频（Chirp）声纳作为声源，来探测海底浅地层构造情况的一种浅地层剖面仪。与此同时，为了产生具有足够穿透力的低频，它的换能器必须做得大而

重，分辨率也较差。于是人们提出了参量阵（非线性调频）原理，利用该原理德国 Innomar 公司研制了 SES-96 参量阵测深/浅地层剖面仪。总体来看，Chirp 技术在地层分辨率上具有极高的性能，而其勘探深度的限制有使其应用范围具有很大的限制。

同时，传统的 Boomer 为电磁式剖面仪，但其声能发射机（震源）输出的电压通常为几千伏，针对该问题，研究人员在设计上进行重大改进，采用独特低压技术的新型浅地层剖面仪（C-Boom）应运而生^[5]。

浅地层剖面探测技术起源于 20 世纪 60 年代初期，其后广泛应用于港口建设、航道疏浚、海底管线布设，以及海上石油平台建设等方面。70 年代以来，随着近海油气资源的大规模开发和各种近岸水上工程建设项目的不断增加，以及各种地质灾害的频繁发生和发现，浅地层剖面探测的重要性越来越为人们认识^[6,7]。同时，浅地层剖面探测设备呈现多元化的发展趋势，目前广泛使用的浅地层剖面探测设备的主要产品类型及其技术规格入表 1 所示。

表 1 浅地层剖面设备的主要产品及其技术规格（据刘保华，2005 年）

Tab.1 Major product and technology-specification of sub-bottom profiler equipments (by Baohua Liu, 2005)

生产厂家	型号	频率/kHz	分辨率/cm	穿透深度/m	工作水深/m
Innomar	SES-96	96 和 108 差频	3	10	0
	SES-2000	3.5~12 和 100 差频	5	<50	3~1 500
EdgeTech	3100-G	4~24	4~8	2~40	300
	3300	2~16	6~10	6~80	3 000
Benthos	SIS-1000	2 和 7（Chirp）	20	50	2 000
	SIS-3000	2 和 7（Chirp）	10	50	3 000
C-Products	C-BOOM	0.5~3	30	80	0
GeoAcoutics	GeoChirp II	0.5 和 13 Chirp	6	根据岩性定	3 000
	GeoPulse	2~12	10~20	根据岩性定	0

2 浅地层剖面探测工作原理

浅地层剖面探测工作是通过换能器将控制信号转换为不同频率（100 Hz~10 kHz）的声波脉冲向海底发射，该声波在海水和沉积层传播过程中遇到声阻抗界面，经反射返回换能器转换为模拟或数字信号后记录下来，并输出为能够反映地层声学特征的浅地层声学记录剖面。

声学地层探测系统是利用声波反射的原理来探测地层的。声波在海底传播，遇到反射界面（界面两侧的介质性质存在差异）时发生反射，产生反射波的条件是界面两边介质的波阻抗不相等。换句

话说，决定声波反射条件的因素为波阻抗差（反射系数 R_{pp} ）。波阻抗为声波在介质中传播的速度 V 和介质密度 ρ 的乘积。

在浅地层剖面调查中，近似认为声波是垂直入射的，此时

$$R_{PP} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

由上式可知：要得到强反射，必须有大的密度差和大的声速差，如相邻两层有一定的密度和声速差，其两层的相邻界面就会有较强的声强，在剖面仪终端显示器上会反映灰度较强的剖面界面线。当声波传播到界面上时，一部分声信号会通过，另一部分

声信号则会反射回来;而且在每一个界面上都会发生此现象。应用到地学中,即声波阻抗反射界面代表着不同地层的密度和声学差异而形成的地层反射界面。 ρV 称为声阻率,简单地说,海底相邻

两层存在一定声阻率量差,就能在剖面仪显示器上反映两相邻的界面线,并能分别显示两层沉积物的性质图像特性差异。利用这个原理,人们发明了声学地层剖面系统(图1)。

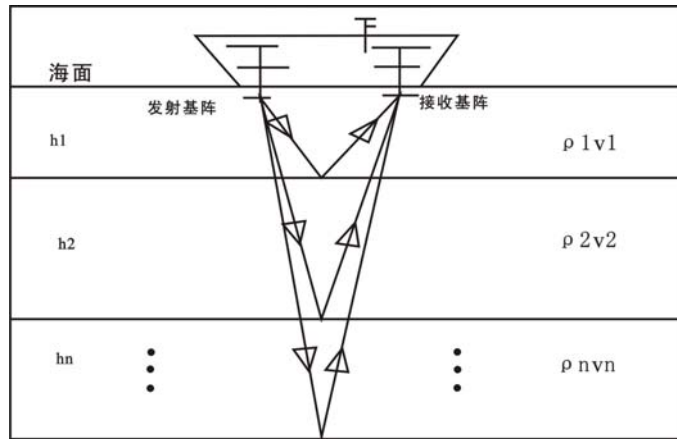


图1 浅地层剖面工作原理

Fig.1 Principle of sub-bottom profile

由于不同的沉积物存在着密度差异和速度差异,这种差异在声学反射剖面上表现为波阻抗界面,差异越大,波阻抗界面就越明显(振幅越强)。由不同物质组成的相同地质年代的岩层,由于彼此间存在着密度和速度的差异,会形成多个反射界面,而不同年代的岩层,也可能由于物质组成相同、密度差异不大而不存在明显的声学反射界面。因此,声学地层反射界面与地质界面或地层层面之间存在着不完全对应关系。但在大多数情况下,不同年代的岩层存在着不同的物理特征,声学反射特征也有差异,因而依据声学反射剖面划分的反射界面往往与地层界面是吻合的。这种反射界面一般能够代表不同地质时代、不同沉积环境和物质构成的真实地层界面。

在依据反射界面进行浅地层剖面实际解译过程中,应该首先与测区内地质钻探资料进行层位对比,并充分利用邻区资料和周边地质环境条件,结合记录中的沉积结构、层位标高、堆积、侵蚀、界面的整合、不整合接触、层理结构、相位变化等特征来分析研究声学记录中地层沉积特征以及其它地质信息。这样,一般而言能够得到与实际情况较为相符的结论。

3 浅地层剖面探测主要影响因素

浅地层剖面探测结果受多种因素制约,如仪器

本身的技术性能指标,海底底质特征,探测过程中的噪声及其压制,其他各种干扰,以及解译者的实际水平、经验等。其中绝大多数是可以改良甚至是避免的,因此,在实际探测过程中,应根据具体情况,综合实际因素施测,以达到最优的探测效果。

3.1 海底底质

海底地质构造状况,尤其是海底底质类型特性决定仪器所能勘测的深度范围。海底底质是砂、岩石、珊瑚礁和贝壳等硬质海底严重制约声波穿透深度,限制仪器勘探的深度。例如,浅地层剖面探测深度砂质海底小于30 m,泥质海底可达100多m,两者存在巨大的差异。

3.2 噪声

处于系统带宽范围内的外界声源信号都可能串入造成干扰信号图像,包括低频船只机械噪声和环境噪声等。噪音在浅地层剖面记录上可能都会或多或少地显示出来,降低勘测数据质量,甚至对判读、解译结果产生重大的影响。因此,正确地识别,甚至消除噪声的影响是十分重要的。

3.3 船只摆动

为获得具有良好效果的浅地层剖面探测数据资料,调查船走航过程中应尽量保持匀速慢速稳定行驶,船速和航向不稳定造成船只摇摆,使拖鱼不能保持平稳状态,造成图像效果不佳。同时,涌浪

也可使船只摇摆,致使拖鱼不稳定。

其他影响因素还包括海气界面,海气界面能将发射声能几乎全部反射,几乎无发射声波触及目标。如果采用船尾拖曳换能器,船的尾流对地层反射信号也能产生干扰,施测过程中应该使换能器尽量避开船的尾流区,通常采取使换能器入水深度加深,或者加长拖缆的方法。另外,海水深度、潮汐作用及海底起伏均对浅地层剖面探测有着直接的影响。

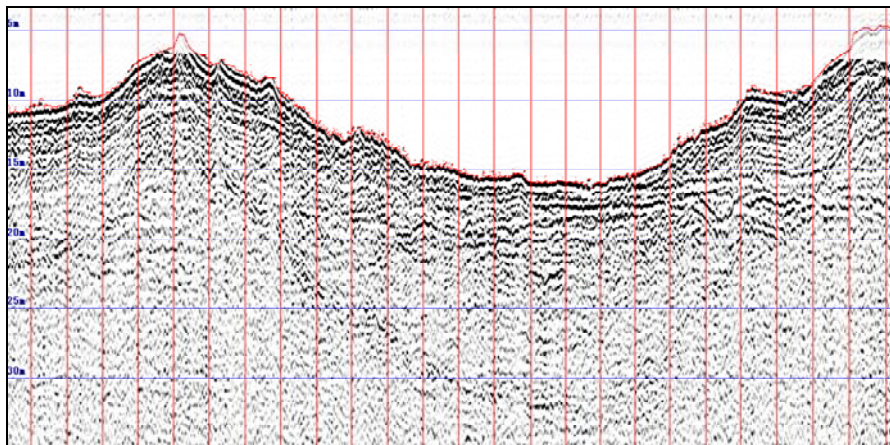


图 2 典型地层剖面声图

Fig. 2 Typical sub-bottom profile

声学地层层序实质是地层界面间声波阻抗差异的反映。浅地层剖面的地质解译,是根据沉积物的岩性变化、沉积物密度、沉积层构造、层面特征以及沉积层延伸与错断等进行解译。

4.2 多次反射图像

凡波阻抗存在差异的界面上都能发生波的反射。在有多个波阻抗界面时,波在某个界面反射后可能在另一个界面又进行一次以上的反射再返回海面,这种现象称为多次反射(图3)。通常,多次反射波也是一种干扰,如果把它们作为一次反射波解释,会得出错误的地质结论,例如夸大沉积层厚度,混淆地层接触关系。通常来讲,不整合面、基岩面和玄武岩面等强反射界面容易产生多次波。识别多次波的方法很多,最好利用钻孔资料、区域地质资料或与其他物探成果对比。

4.3 干扰图像

干扰图像主要可包括直达波干扰和侧向发散干扰。直达声波干扰由于换能器基阵 90° 方向的灵敏度较高,换能器发射声波会有一部分向水平方向射出,该部分声波直接被接收换能器接收,形成直

4 主要声学剖面类型及其特征

4.1 声学地层层序图像

浅地层剖面测量所获取的声学记录剖面是地质剖面真实反映。声地层层序是沉积层序在浅地层声学记录剖面上的反映(图2)。根据反射波的振幅、频率、相位、连续性和波组组合关系等,界定声阻抗界面,进而划分声学反射界面。

达波记录。当收、发换能器间距小于测区水深的2倍时,直达波被反映在海底线之上端,呈现细而均匀的线条与零位线平行,可呈现多条平行线。侧向发射干扰是由于发射换能器具有较大波束角,当船近岸壁、突起暗礁时会有反射面形成侧向反射干扰图像(图4)。

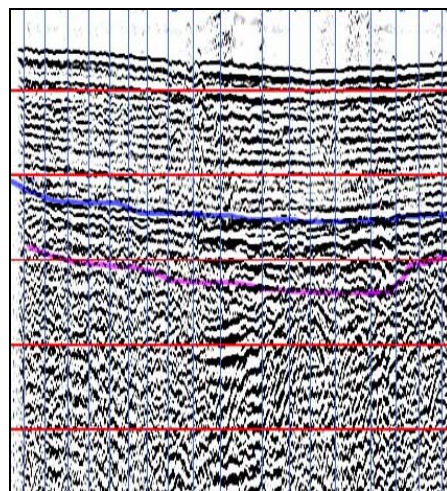


图 3 典型二次反射图像声图

Fig.3 Typical twice-reflection sound-picture

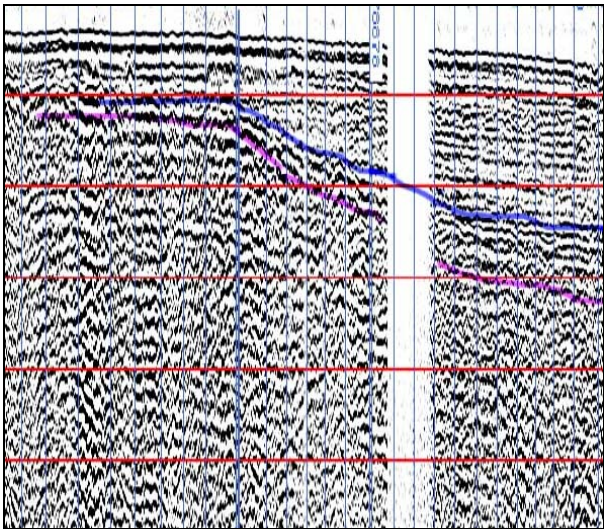


图 4 典型干扰图像声图
Fig. 4 Typical interference sound-picture

此外，主要声学剖面类型还包括水体图像，指浅地层剖面仪记录到的发射线至海底之间的图像。

5 剖面声图特征及其地层学解释

浅地层剖面声图反映海平面变化，在冲积平原或近岸环境中反映沉积环境的变迁过程。剖面声图的层理是指剖面声图显示具有一定灰度的点状、块状和线状图形组成的图像，反映不同性质的海底浅部地层特征^[8]。

5.1 简单层理

简单层理包括平行层理和发散层理。平行简单层理为点状和线状图像（图 5），主要反映了地壳平稳、均匀一致沉降，表明在低能量沉积环境中的细颗粒沉积物。发散型沉积层结构主要反映了相对稳定或稳定下沉的大陆架、盆地充填等的匀速沉积环境。发散结构则意味着沉积速率上有侧向变化或沉积表面的逐步倾斜。简单层理常形成于海平面上升后的浅海环境中，多为细粒沉积物的沉积层。平行层理主要在海平面上升后浅海环流作用下形成，同时也表明沉积层组成多是粘土或者粉、细砂。

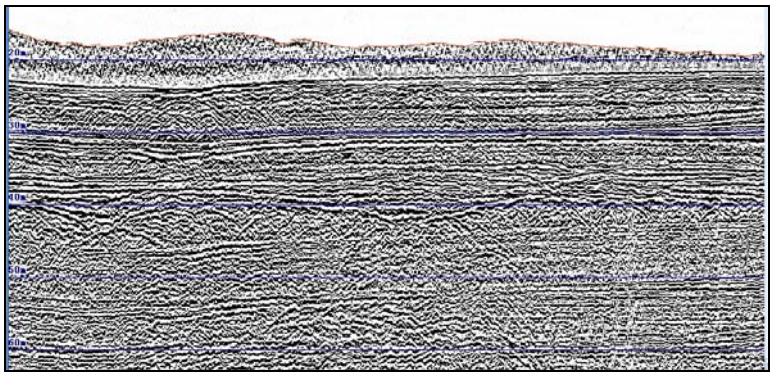


图 5 典型简单层理声图
Fig. 5 Typical simple sound-picture

5.2 复杂层理特征

复杂层理可进一步细分为复杂斜层理、S 型复杂层理和杂乱层理等 3 种类型。其中复杂斜层理是由点状、线状和点线状图形组成的不平行倾斜状图

形，通常表示河流、河流三角洲或者近岸平原等沉积环境（图 6）。S 型复杂层理由 S 型的线状或块状图形组合而成的图像，通常表示三角洲及浅海环境，沉积物粒度从细到粗的沉积序列。杂乱层理是

由不连续、不整合的点状或线状图形组合的图像，表示高能沉积环境，它反映各种不同的沉积速率，或者沉积后基底瓦解，崩积后残、堆积等沉积过程。

点、线状平行或微倾斜图像表明河流泛滥平原

或河流决口扇，形成粗、细粒混杂的沉积层。点、线状斜交的倾斜层理图像显示了在该层形成河道，在河道中粗粒沉积物的交错层理。点、线状杂乱层理图像表明该沉积层是粗粒的沉积物，沉积物可能残积或崩积形成沉积层，该层顶部被认为是在低海平面时期形成的地表侵蚀面。

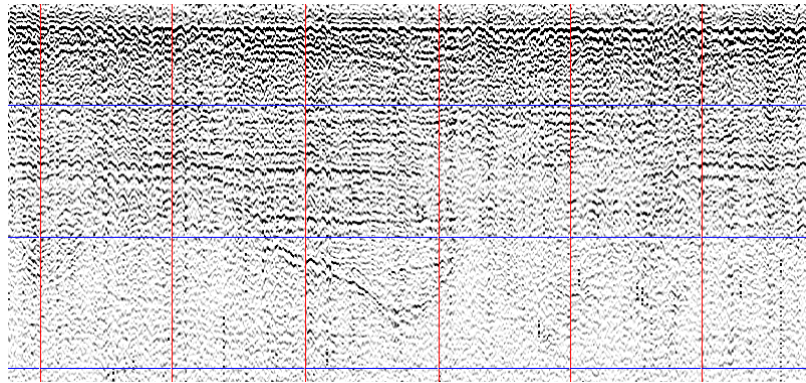


图 6 浅部地层中发育的碟状洼地和扰动体（莱州湾）

Fig. 6 Eroded channel and interference-body in the sub-bottom profile (Laizhou bay)

5.3 无声反射带

无声反射带就是声图中不存在具有一定灰度的点状、块状和线状图形，而几乎是一片空白带或干扰图像（图 7）。点状图形无序组合图像表明该层是声波屏蔽带，也可称无声反射带或称无声信号带，一般认为是该沉积物中含有气体或泥炭层，该

层中高分辨率的高频信号衰减得最快，或者说声波信号被较快吸收掉，因此，声波在该层穿透深度很小。产生无声反射带的原因是沉积物中有天然气或泥炭层或者为均一的粉细砂层^[9]。另外，由于含气沉积物对声能量的屏蔽作用，有时剖面上在反映含气沉积物的杂乱反射下也会出现无反射区。

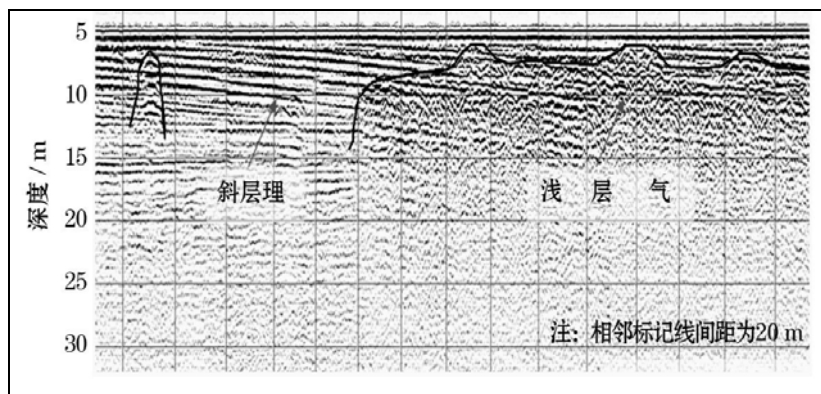


图 7 黄河口浅部地层中的无声反射带（据闫章存，2007 年）

Fig. 7 No-noise reflection in the sub-bottom profile of Huanghe estuary (by Zhangcun Yan, 2007)

6 总 结

浅地层剖面勘测是一种基于水声学原理的连续走航式探测水下浅部地层结构和构造的地球物

理方法^[10,11]。利用浅地层剖面仪可以有效获得海底以下的浅部地层结构和构造，并可分析出海底以下存在的灾害地质因素如埋藏古河道、浅层气、浅部断层、软弱地层和浅部基岩等。近年来，尽管浅地

层勘测技术取得长足进步,但由于勘察过程受诸多因素的影响及其具有的多解性特征,浅地层剖面施测应尽量与钻孔相配合,取得良好的勘察效果。因此,了解浅地层剖面勘测的影响因素,声学剖面类型及其地质解释,并在人工判读过程中尽可能消除环境因素的影响,对正确和准确地识别海底状况是非常有意义的。

参考文献:

- [1] 张金城,蔡爱智,郭一飞,等. 浅地层剖面仪在海岸工程上的应用 [J]. 海洋工程, 1995, 13(2): 71-74.
- [2] 张兆富. SES-96 参量阵测深/浅地层剖面仪的特点及其应用 [J]. 中国港湾建设, 2001, 6(3): 41-44.
- [3] 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): 87-93.
- [4] 丁维凤, 冯霞, 来向华, 等. Chirp 技术及其在海底浅层勘探中的应用 [J]. 海洋技术, 2006, 25(2): 10-14.
- [5] 李增林, 亓发庆. 采用独特低电压技术的新型浅地层剖面仪 C-Boom [J]. 海岸工程, 2005, 24(3): 72-77.
- [6] 魏恒源. 浅地层剖面仪在水域工程勘测中的应用 [J]. 华南地震, 1996, 16(4): 73-79.
- [7] 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.
- [8] 徐怀大, 王世凤, 陈开远. 地震地层学解释基础 [M]. 中国地质大学出版社, 1988: 5-63.
- [9] 潘国富. 浅层地震声学剖面的声地层学解释 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(1): 93-104.
- [10] 王化仁, 田春和, 王鹏, 等. 浅地层剖面仪在管线铺设路由调查中的应用 [J]. 水道港口, 2007, 28(2): 133-135.
- [11] 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.