

- Xu Maokai. The development of carbon fiber reinforced plastic cables [J]. Fiber Composite, 2010(3): 29-31.
- [22] Mallick P K. Ultimate possibility in long span bridging[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(11): 2547-2560.
- [23] Dan M F, Imai K. Reliability of long span bridges based on design experience with the Honshu-Shikoku bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3-5): 373-392.

## Study on long-span rail-road cable-stayed bridge for cross-sea channel

LEI Junqing, HUANG Zuwei, CAO Shanshan, LIU Haosu, GUI Chengzhong

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** Resource conservation and environmental protection need to be considered most when it comes to cross-sea bridge. Long-span rail-road cable-stayed bridge is a primary choice for cross-sea bridge, which shows advantage in saving channel resources. According to the investigation on long-span rail-road cable-stayed bridges which are existing or under construction worldwide, some key technologies are addressed. At the same time, research on durability of steel girder and stayed cable is conducted, in which a contrastive analysis on structural systems and arrangements is carried out on the basis of structural features of long-span rail-road cable-stayed bridges. Solutions to the problem to further increase the span of long-span rail-road cable-stayed bridge are also put forward. Results of this paper could be taken as technical reference for the design of the same type of cross-sea bridges.

**Keywords** cross sea channel bridge; rail-road bridge; long-span cable-stayed bridge; structural system; bridge durability

(责任编辑 韩星明)

# 跨海通道工程勘察与监测新技术

宋士林<sup>1</sup>, 徐家声<sup>2</sup>, 尹聪<sup>1</sup>

1. 国家海洋局北海海洋技术保障中心, 青岛 266033
2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

**摘要** 综述了目前应用在海底勘探、监测方面的高新技术及方法, 探讨了其在跨海通道建设中的应用的可行性。分析表明, 合成孔径声纳系统、海底三维成像系统、浅地层剖面探测系统等新技术的应用, 能够比目前常规的勘察及监测技术获取更全面、更准确的数据, 效率更高, 能够为跨海通道建设勘察、通道安全运行提供新的更全面准确的手段和方法。充分运用现代高新技术手段, 可以准确全面地进行跨海通道工程的勘察和监测, 及时发现风险, 及时评估, 及时制定防控措施, 保证通道安全建设和运行。

**关键词** 跨海通道工程; 工程勘察及监测; 双频合成孔径声纳; 海底三维成像声纳

经过 20 多年的不断研究和艰苦工作, 渤海海峡跨海通道建设受到社会各界高度关注, 也引起中央领导高度重视, 并列入国家、山东省和辽宁省的相关规划。由于该工程巨大的经济和社会意义, 同时在技术上已经完全可以实现, 相信该项目进入建设指日可待。但是, 该通道所在的渤海海峡, 是渤海水体进出的通道, 水体流速大, 岛屿连绵, 海沟纵横, 海底地形复杂多变, 海洋环境复杂, 海洋灾害事件时有发生; 同时, 通道建设是工程浩大、技术复杂的艰巨海洋工程, 建设形式多样, 也会在一定程度上引起海洋环境的变化, 这种变化反过来会对工程产生影响。因此, 对跨海通道路由进行全面、细致的勘察和运行监测必不可少, 有了详实的路由勘察资料, 才能保证跨海工程的准确设计和顺利建设; 有了全面准确的监测数据, 才能保证跨海通道的安全运行。目前在海洋工程海底调查手段方面, 大多使用传统的如多波束测深系统、侧扫声纳系统、浅地层剖面仪等, 这些设备虽然能够满足工程需要, 但也存在分辨率不高、作业效率低等不足。而近几年逐渐出现了合成孔径声纳海底探测系统、三维成像声纳系统等获取数据更全面更准确、分辨率更高的新技术新方法<sup>[1-4]</sup>。虽然这些装备应用较少, 但已经进入成熟应用阶段, 完全可以在海底工程勘察和海洋调查中发挥重要作用。本文综述几种新技术装备的作用及性能。

## 1 双频合成孔径声纳

### 1.1 合成孔径声纳技术

合成孔径声纳(SAS)的思想来自合成孔径雷达(SAR)。1951年6月, 美国 Goodyear Aero-space Co. 的 Carl Wiley 等提出了使用频率分析方法可以提高雷达的方位向分辨率。此

后, SAR 技术经过半个多世纪的发展, 已相当成熟, 并取代了传统侧视雷达, 成为军事和民用方面的重要观测手段。但由于声波传输速度比电磁波低、水下环境恶劣、载体平台运动不稳定等原因, 合成孔径技术在声纳上的发展滞后于雷达。1967年, 美国 Raytheon 公司提出合成孔径技术可以应用到水声信号处理中。1969年, Walsh 发表了关于 SAS 系统的论述。1973年, Sato, Ueda 和 Fukoda 公布了第一次 SAS 水池试验结果。Willimas 于 1976年、Christoff 等于 1982年、Gough 和 Hayes 等于 1989年的试验表明, 水声信号的相干性能够满足合成孔径成像的要求, 使用多子阵的方法可以突破声速对载体运动速度的限制。从 20 世纪 90 年代开始, SAS 已经成为水声信号处理的热点之一。国际上已出现了多种不同型号的 SAS 系统样机, 如 5 个欧洲国家参与研制的 SAMI SAS、Raytheon 公司的 DARPA SAS、法国汤姆逊公司的 IMBAT3000 SAS、法国 IXSEA 公司的 SHADOW SAS 和新西兰 Canterbury 大学的 Kiwi SAS 等。

在此基础上, 美国和欧洲国家推出了一系列商用合成孔径声纳产品, 美国、法国、挪威和瑞典海军也陆续开始配置合成孔径声纳作为反水雷装备, 典型产品包括瑞典 FOI 研制的 SAS、挪威 FFI 研制的 SAS、法国的 IXSEA SAS、意大利的 NATO NURC SAS、美国的 CSS SAS 等。但从公开的文献调研看, 国外尚没有推出双频合成孔径声纳设备。

中国科学院声学研究所在国家高技术研究发展计划(863计划)的支持下, 于 1997 年启动对 SAS 的研究, 经过十多年的发展, 在理论和技术上取得了很大进展, 先后研制出高频系统、低频系统样机。在此基础上, 2013 年开始进行双频合成孔径声纳研究, 在高频和低频合成孔径成像技术集成的

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-09-30

基金项目: 国家重大海洋调查和海洋科研专项(201305026)

作者简介: 宋士林, 研究员, 研究方向为海洋调查及海洋技术, 电子邮箱: songshilin@bhj.gov.cn

引用格式: 宋士林, 徐家声, 尹聪. 跨海通道工程勘察与监测新技术[J]. 科技导报, 2016, 34(21): 34-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.21.004

过程中解决了重量、体积、功耗、双频同步工作、可靠性和稳定性等一系列关键问题。

SAS 高分辨率包括高距离向分辨率和高方位向分辨率两个方面。高距离向分辨率通过脉冲压缩获得,而高方位向分辨率通过合成孔径原理获得。与侧扫声纳不同,SAS 的方位向分辨率理论上与信号频率、目标距离无关,完全由基阵尺寸决定,且基阵尺寸越小,方位向分辨率越高。这是因为,基阵尺寸越小,波束越宽,目标接收回波信号的时间越长,对应的合成孔径越长。方位向分辨率的极限为  $\lambda/4$ 。所以相比侧扫声纳,SAS 可以使用更低的信号频率,获得更高的方位向分辨率。因此,合成孔径声纳的特点非常突出,与侧扫声纳相比,一是分辨率明显提高,二是分辨率与目标距离拖体的距离无关,距离远近分辨率是一致的,这就大大提高了工作效率。

### 1.2 双频合成孔径声纳技术

SAS 可用于水底二维高分辨率成像。由于能工作在比侧扫声纳更低的频率,SAS 可以获得更远的传输距离,从而获得较高的测绘效率,且声波信号穿透性较强,能够用于探测掩埋目标。由于这一特性,使得进行双频合成孔径声纳研制成为可能。

双频合成孔径声纳技术是在高频段使用大的带宽和脉宽信号,通过脉冲压缩的方法得到距离向高分辨,低频段则是利用较低频信号在水声信道中较低衰减的特点和较好的穿透特性,从而保证了在不丧失方位向分辨率的同时又具有较大的作用距离和对掩埋物体的探测能力。并且双频合成孔径声纳的双频同时成像,便于对水下物体存置特性进行对比分析,能够满足水下监测阵、光缆、电缆等探测任务的需求。

中国科学院声学研究所的双频合成孔径声纳(DF-SAS)系统,是在海洋公益性行业科研专项“海底管道探测技术集成及风险评估技术与示范应用(201305026)”资助下集成研发的声纳设备。DF-SAS 系统是利用实孔径基阵的运动合成虚拟的大孔径以提高探测分辨率的水声成像设备,它集成了高、低频合成孔径声纳,目前测量船加装的设备工作在拖曳模式下,已经进行了多次湖上和海上试验,获得了清晰的水底成像结果,并已进入示范应用阶段。双频合成孔径声纳系统各部分组成如图 1 所示。

该双频合成孔径声纳系统除了高低频双频段工作之外,其最大探测深度超过水下 1000 m,拖曳深度达到水下 1000 m,声

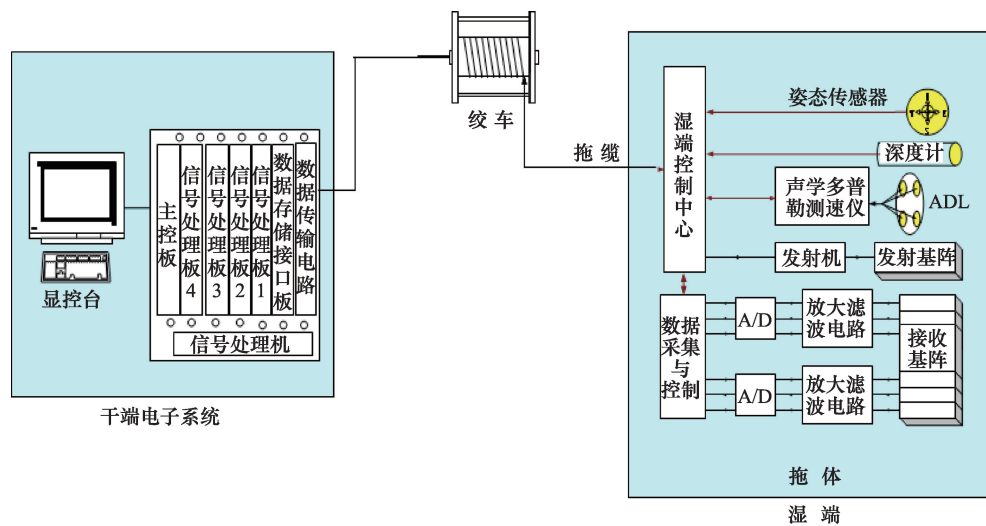


图 1 DF-SAS 系统组成  
Fig. 1 DF-SAS system composition

纳拖鱼由拖曳母船供电功耗仅为 500 W,拖鱼长 2.5 m,直径 0.5 m,最大探测距离双侧 600 m,探测分辨率可达  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 。针对掩埋物体,双频合成孔径声纳可以探测掩埋深度不大于 5 m 的线状目标,目前实验证明的掩埋物最小直径 8 cm。双频合成孔径声纳探测工作示意如图 2 所示。此外双频双侧合成孔径声纳系统还集成了高精度差分 GPS 及水下超短基线定位设备。

### 1.3 双频合成孔径声纳效果分析

基于合成孔径声纳的双频合成孔径声纳技术可以广泛应用于海底地质地貌、海底管道安全状态(悬空、裸露、掩埋)以及人类活动痕迹等的探测与分析,从而实现海底目标的

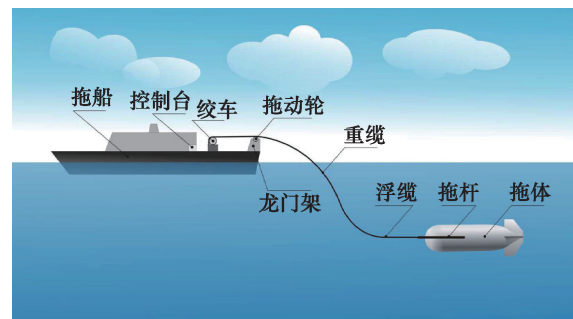
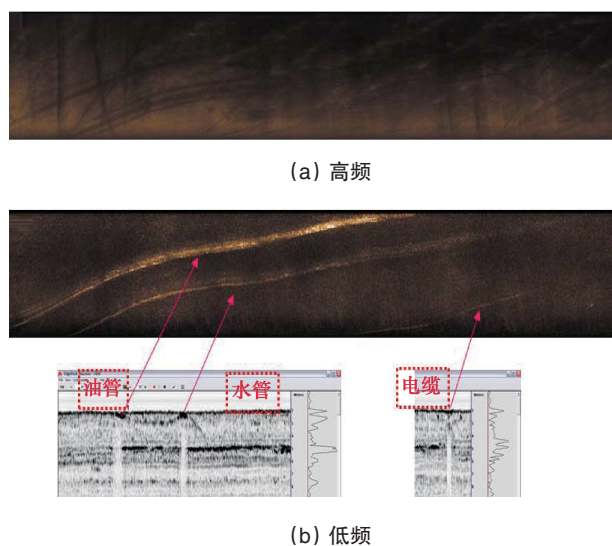


图 2 双频合成孔径声纳工作示意  
Fig. 2 Synthetic aperture sonar at work

布设及检查、海底地形地貌的判别、海底地质结构的鉴别及分类、水文因素引起海底变化等,对海洋规律的探索、海洋的开发利用以及军事活动都具有重要的研究价值和意义。

为了验证双频合成孔径声纳系统的探测效果,选取海底管道密集的油田区进行实验。实验前,对实验区海底的管道情况进行了解,对管道的位置及埋深、哪里有裸露管道等基本掌握,有针对性地布设实验测线。实验结果表明,DF-SAS具有良好的管道探测能力,对至少埋深2 m的海底管道能形成清晰的连续图像,并可进行持续追踪。

双侧双频合成孔径声纳成像与浅地层剖面仪验证的对比结果如图3所示。

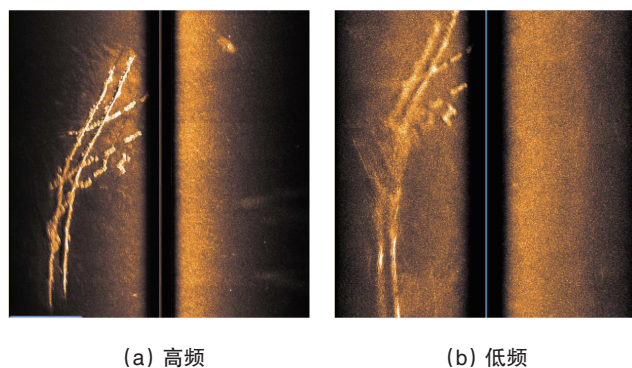


电缆直径 14 cm;水管直径 50.8 cm;油管直径 101.6 cm

图3 掩埋管道探测结果

Fig. 3 Detection results of buried submarine pipelines

图4所示为石油钻井平台附近的管道成像,该钻井平台下方部分区域的管道未掩埋而是采用压块压置。



(a) 高频 (b) 低频

图4 钻井平台下方管道探测结果

Fig. 4 Detection results of submarine pipelines under drilling platform

实验结果表明,双频合成孔径声纳系统主要有两大优点,一是对目标的分辨能力及距离与采用的声信号频率无关,因此既可以采用高频发射信号进行高分辨率成像,也可以采用低频发射信号进行掩埋目标的探测;二是可以采用小尺度的声纳基阵获得高分辨率的目标图像,且方位向分辨率在全测绘带上保持恒定高分辨率,不受作用距离影响。双频合成孔径声纳系统兼具高分辨率的特点以及沉底、半掩埋、掩埋管道的探测能力,是海底探测的理想手段。

## 2 三维海底成像系统

三维海底成像系统是通过高低频探测技术的组合设计,加上高效率的处理软件,形成对一定尺度及范围海底的三维探测成像记录。在三维记录图中,可以准确判断地层及其中物体(包括掩埋海底管道)的尺度。三维海底成像系统的工作示意及效果如图5、图6所示。



图5 三维海底成像系统工作示意

Fig. 5 Working scene of the three-dimensional seafloor imaging system

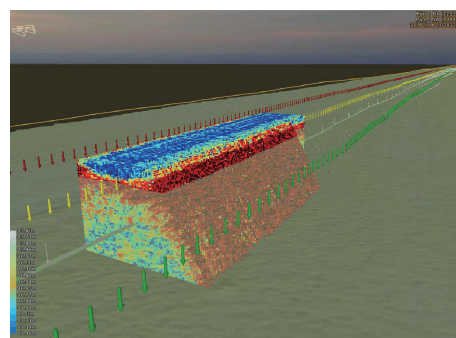


图6 三维海底成像系统工作效果

Fig. 6 Image presentation of the three-dimensional seafloor imaging system

目前正在国内推广的如Sub-Bottom Imager (SBI)海底成像器,可以对海底以下5 m×5 m(宽×深)的地层形成测绘带,可以达到10 cm的三维分辨率,并且可以装配到船舶以及ROV、AUV等平台,具有一定的灵活性。应用于掩埋管道探测虽然准确性高,但缺点也比较明显,一是由于探测范围小,需要很好的定位能力,否则很难准确地定位在管道的位置上;二是效率较低,成本较高。

### 3 浅地层剖面探测

浅地层剖面仪是20世纪60~70年代问世的一种水下声波探测系统,它所发射的低频声波对海底有一定的穿透深度,是利用声波在介质中传播时遇到不同声学特性的分界面时会发生反向散射,接收反向散射声波并按回波的时间先后以及灰度等级或色彩来表征回波的强度,在平面上绘制出像瀑布一样的剖面图,这种平面图可以直观地看到水底以下地质构造情况。地层剖面仪广泛应用于海洋地质调查、港口建设、航道疏浚、海底管道布设以及海上石油平台建设等方面。与钻孔取样相比,利用剖面仪进行地质调查具有操作方便、探测速度快、记录图像连续且经济等优点。

当地层中有建筑目标时,由于地层与目标的界面两侧声阻抗差异较大,容易形成强烈的反射波,同时在这一界面处常常产生绕射波,而绕射波在时距剖面图像上为双曲线反映,双曲线顶部位置与航迹的直线距离最近,在浅剖图像中,埋藏目标的双曲线顶部位于海床面以下,可以据此判断目标埋藏深度;出露目标的双曲线顶部位于海床面之上,可以据此判断目标的暴露高度。由上述可知,浅地层剖面仪可以探测埋藏海底目标,通过时距剖面上的特征图像就能确定目标的位置及其埋深。浅地层剖面仪记录的海底埋藏管道图谱如图7所示。

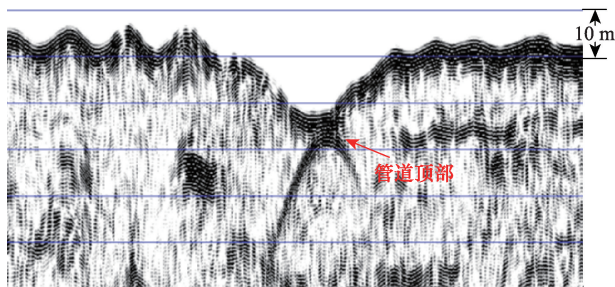


图7 浅地层剖面仪记录的海底埋藏管道图谱

Fig. 7 Map of buried submarine pipelines recorded by sub-bottom profiler

浅地层剖面仪根据频率及功率的不同,分为深层、中层、浅层多种穿透能力的不同类型。海底管道探测一般使用高频、高分辨率、穿透较小的剖面仪,通常称为管道探测仪,主要有SES-96、SES2000参量阵剖面仪、Chirp III浅地层剖面仪、EdgeTech 3100P便携式浅地层剖面仪,这些设备一般使用高频高分辨技术,垂向分辨率可以达到几厘米。

但是剖面仪有其固有的缺陷,在探测作业时测线必须垂直于海底管道轴向才能探测到管道,作业时测线布设基本原则是垂直管道走向布设,一般采用以管道的走向为轴线,按“Z”字形走航测量的方式来进行测量,而平行于管道布设测线是探测不出管道的。这样大大降低了探测效率及作业难度,但探测的仅仅是测线与管道相交时的一个点,不能连续探测管道。

### 4 结论

渤海海峡跨海通道是一项工程浩大、技术复杂、施工工期长、对海洋环境影响大的系统工程,建设及运行过程中要充分考虑到复杂海洋环境特别是不良地质现象对通道的不利影响,同时也要考虑通道建设对海洋环境的影响。为全面掌握通道路由的地质情况,勘察及监测包括海底监测必不可少,这对通道的安全建设和运行意义重大。进行海底勘察、监测要充分运用现代高新技术手段,以准确全面地进行勘察和监测,及时发现风险,及时评估,及时制定防控措施,保证通道安全建设和运行。

#### 参考文献(References)

- [1] 杨敏, 宋涅. 掩埋海底管道探测方法研究及新技术应用[J]. 海洋科学, 2015(6): 129-132.  
Yang Min, Song Sheng. Discussion methods of buried submarine pipeline detection and application of new technology[J]. Marine Sciences, 2015, (6): 129-132.
- [2] 杨敏, 宋士林. 合成孔径声纳技术以及在海底探测中的应用研究[J]. 海洋科学, 2016(2): 51-56.  
Yang Min, Song Shilin. Research on the synthetic aperture sonar technology and its application in seafloor exploration[J]. Marine Sciences, 2016(2): 51-56.
- [3] 李哈汀, 胥新伟, 高潮, 等. 港珠澳大桥沉管隧道施工监测系统[J]. 中国港湾建设, 2015(7): 49-52.  
Li Hating, Xu Xinwei, Gao Chao, et al. Construction monitoring system of immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao bridge [J]. China Harbor Engineering, 2015(7): 49-52.
- [4] 吴晓青, 程国山, 王雪燕. 渤海海峡跨海通道建设对环渤海地区海洋功能区划的影响[J]. 海洋开发与管理, 2009(7): 109-112.  
Wu Xiaqing, Cheng Guoshan, Wang Xueyan. The impact of Bohai sea passage construction on the marine function zoning of circum-Bohai sea region[J]. Ocean Development and Management, 2009(7): 109-112.
- [5] 徐继尚, 李广雪, 曹立华, 等. 海底管道综合探测技术及东方1-1管道不稳定因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 43-49.  
Xu Jishang, Li Guangxue, Cao Lihua, et al. Integrated submarine pipeline investigation techniques and df1-1 pipeline unsafety factor analysis [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(5): 43-49.
- [6] 徐国强, 元大庆, 阙长宾, 等. 浅海海底管道探测技术探讨[J]. 海岸工程, 2013, 32(2): 20-29.  
Xu Guoqiang, Qi Faqing, Kan Changbin, et al. Analysis of technology used for submarine pipeline detection in the shallow Seas[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(2): 20-29.
- [7] Hansen R E, Callow H J, Sabo T O, et al. Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(10): 3677-3687.
- [8] Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 207-24.
- [9] 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 64-67.  
Zhou Xinghua, Jiang Xiaojun, Shi Yongzhong. Application of side scan sonar and sub-bottom profile in the checking of submerged pipeline in hangzhou bay[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(4): 64-67.
- [10] 仲德林, 吴永亨, 刘建立. 埕岛海上石油平台周边海底管道与电缆

- 的探测技术研究[J]. 海岸工程, 2004, 23(4): 32-37.
- Zhong Delin, Wu Yongting, Liu Jianli. Techniques for detecting submarine pipeline and cable in the neighborhood of Chengdao offshore oil platform[J]. Coastal Engineering, 2004, 23( 4): 32-37.
- [11] 胡洪勤. 埕岛油田海底管道冲刷及工程治理[J]. 海洋科学, 2005(6): 13-16.
- Hu Hongqin. Anti-scouring engineering for submarine pipeline in Chengdao oil field[J]. Marine Sciences, 2005(6): 13-16.
- [12] Hayes M, Barclay P. The effects of multipath on a bathymetric synthetic aperture sonar using belief propagation[J]. Aperture, 2003, 41(2): 86-89.
- [13] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): 12-13.
- [14] Gough P, Hawkins D. A short history of synthetic aperture sonar[J]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 1998, 2: 618-620.

## Research on the new technology of engineering investigation and monitoring of cross-sea passage

SONG Shilin<sup>1</sup>, XU Jiasheng<sup>2</sup>, YIN Cong<sup>1</sup>

1. North China Sea Marine Technical Support Center, State Oceanic Administration People's Republic of China, Qingdao 266033, China
2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Qingdao 266061, China

**Abstract** The purpose of this paper is to describe the new methods of engineering investigation for pre-stage cross-sea passage project and new methods of monitoring after project completion. Based on the analysis of hi-tech equipment and new technologies used at present in seafloor exploration and monitoring, their application feasibility in construction of cross-sea passage is studied. It is shown that applications of synthetic aperture sonar system, three-dimensional imaging system, sub-bottom profiler detection system and other new hi-tech equipment can obtain data more comprehensively, accurately and efficiently than current common equipment and provide more comprehensive and accurate methods for cross-sea passage construction investigation and the passage's safe operation. Making full use of these modern hi-tech methods may conduct overall and correct investigation and monitoring to detect risk and implement assessment, as well as work out preventive and control measures in time, so as to guarantee the safe construction and operation of passages.

**Keywords** cross-sea access project; project investigation and monitoring; double-frequency synthetic aperture sonar; three-dimensional imaging sonar

(责任编辑 韩星明)