

潘飞儒, 陈洁, 赵圣麟, 等. 基于三锚式大型浮标平台的海洋地震监测技术分析[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 1-10. [PAN Feiru, CHEN Jie, ZHAO Shenglin, et al. Analysis of Marine Seismic Monitoring Technology Based on Three-anchor Large Buoy Platform [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 1-10]

基于三锚式大型浮标平台的海洋地震监测技术分析

潘飞儒, 陈洁, 赵圣麟, 张刚勇, 叶康杰

(珠海市泰德企业有限公司, 珠海 519085)

摘要: 海洋地震监测是防震减灾的重要工作内容之一, 是提高海域中地震定位精度、监测水平的技术手段, 并可对大地构造、地球动力学等基础地学研究提供宝贵基础信息。根据国内外海洋地震监测技术发展现状, 结合现代海洋资料浮标与海底光缆技术特点, 文中着重探讨基于三锚式大型浮标平台的海洋地震监测技术与方法。研究分析表明: 建设基于海洋浮标平台的地震监测系统更具可行性、可操作性, 采用直径三锚式大型浮标作为“通讯和供电子系统”较为适宜; 海洋地震监测项目的安全关系到了整个系统的稳定运行, 特别要关注“通讯和供电子系统”和“地震观测技术子系统”之间连接的安全保障措施; 海洋地震监测项目质量对保障整个系统具有举足轻重的作用, 在“地震观测技术子系统”海底安装中要注意地震设备的防洋流和与大地耦合的两个重要环节。

关键词: 地震监测; 在线实时; 三锚式浮标; 海底地震计; CORK技术

中图分类号: P715.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0001-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.01

Analysis of Marine Seismic Monitoring Technology Based on Three-anchor Large Buoy Platform

PAN Feiru, CHEN Jie, ZHAO Shenglin, ZHANG Gangyong, YE Kangjie

(Zhuhai Taide Enterprise Co., Ltd., Zhuhai 519085, China)

Abstract: Marine seismic monitoring, one of the most important contents of earthquake prevention and disaster reduction, is a technical methodology to improve the positioning accuracy and monitoring capacity of earthquakes in the sea area, and can provide valuable basic information for basic geological research such as geotectonics and geodynamics. Based on the development status of marine seismic monitoring technology at home and abroad, by combining the technical characteristics of modern marine data buoys and submarine fiber-optic cables, this paper focuses on the marine seismic monitoring technology and method based on three-anchor large buoy platform. The study shows that it is more feasible and operable to construct the seismic monitoring system based on marine buoy platform, and it is more suitable to use three-anchor diameter large buoys as the "communication and electronic supply system". The research has also shown that the security of the marine seismic monitoring project is related to the stable operation of the entire system, and the safety and security measures for the connection between the "communication and electronic supply system" and the "seismic observation technology subsystem" should be paid

收稿日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42276086); 科技部重大科学仪器开发专项(2014YQ100817); 珠海市泰德企业有限公司海洋技术领域工作站联合资助。

作者简介: 潘飞儒(1984-), 男, 工程师, 主要从事地震监测技术研发与系统集成。

E-mail: rugoo_pan@126.com

special attention to. The quality assurance of the marine seismic monitoring project is related to the completion of the whole system. In the submarine installation of the "seismic observation technology subsystem", attention should be paid to the two important aspects of protection against ocean currents and earth coupling of seismic equipment.

Keywords: Seismic monitoring; Online real-time; Three-anchor buoys; Seafloor seismometers; CORK technology

0 引言

海洋是地球上最丰富的自然资源, 约为 $3.35 \times 10^8 \text{ km}^2$ 的面积, 覆盖了地球70.8%的表面, 平均水深3730 m, 可挖掘潜力不可估量。我国东部临海, 海洋国土面积约为 $3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。地球上发生的地震绝大多数分布在海洋, 海洋数量占全球的85%; 在统计全球7级以上地震中, 发现在海洋中发生的地震数量达到80%。海洋地震往往给沿海城市及海洋重要工程造成巨大损失。例如, 2004年印尼苏门答腊9.0级地震^[1]、2011年日本9.0级地震等所引发海啸灾害^[2], 造成重大人员伤亡和财产损失。我国东南沿海处在亚洲板块、太平洋板块和菲律宾板块交界的前沿, 地震活动极为频繁, 其中的海洋地震主要活跃在渤海、黄海、台湾海峡和南海北部等; 因此, 海洋地震也是我国沿海城市群及毗邻海域的自然灾害高风险源。

海洋地震观测是研究海底的地震活动性和进行地震勘探^[3]。按地震信号的“记录—传输—保存”方式, 海域地震观测技术分“自容式海底地震观测技术”和“在线实时海底地震监测技术”两类^[4]。前者指的是高频海底地震计(HF-OBS)、节点式海洋地震计(OBN), 滨海宽频带海底地震计(BBOBS)和深海型宽频带海底地震计(DSB-BOBS)等, 主要用于海洋油气勘探、工程勘查和海底地球深部探测等领域; 后者指的是用锚泊浮标、海底电报电缆或海底光缆作为“通信和供电”平台的在线实时海洋地震监测系统, 主要适用于海域的地震监测。

地震监测是防震减灾的重要工作内容之一, 是提高海域中地震定位精度和监测水平的技术手段。在我国, 陆地—海域的地震监测技术发展极不平衡。如今在陆域已建设了由数百个地震台站和数千个地震监测站, 组成了高分辨率的地震监测网络, 也是全球最大的地震预警网; 而在海域, 因缺乏有效海洋地震监测技术方法, 在线实时(On-line real time)地震观测项目建设几乎空白。又

因为受地震监测台网布局的限制, 陆地台网不能有效记录到深远海的微震或小震活动情况, 导致现今我国地震监测工作不能很好地服务于海洋防震减灾、海洋经济发展以及海洋地学基础研究的尴尬局面。因此, 亟需要优化我国沿海地区地震观测网布局, 建设高时空分辨率地震观测网络, 促进增强海域地震的识别能力, 提高海域地震定位精度, 提升海洋地震预报预警能力。

与陆地地震观测相比, 海洋地震观测困难大、代价高、更重要的是需要相适应的通讯技术^[5]。因而, 在国外, 海洋地震观测站的数量在地球上也是相当有限^[6]。据此, 本文研究将聚焦在线实时海洋地震监测技术方法。通过对国内外相关技术发展、安全和质量保障措施等方面的系统剖析, 结合目前我国海洋地震观测技术研发实际情况, 探索适合我国国情的新技术新方法, 为我国海洋地震监测网络建设提供有效的解决方案。

1 海洋地震监测系统

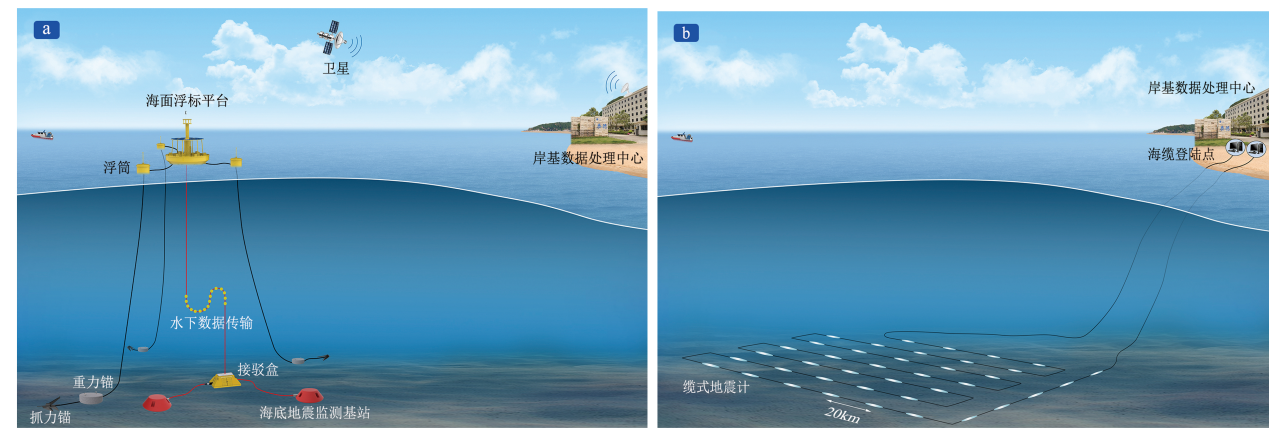
海洋地震监测常指的是“在线实时”海洋地震观测, 主要由三个部分组成: 一是地震观测技术子系统, 二是岸基数据处理子系统, 三是通讯和供电子系统; 这三个子系统分别担负了海洋地震监测系统的地震观测记录数据的“观测记录”、“数据传输”和“实时分析处理”三个重要功能。其中, “通讯和供电子系统”又分浮标和海缆两类, 前者称谓“基于海洋浮标平台的海洋地震监测系统”, 属于单点在线实时观测系统; 而后者可称之为“基于海底网络平台的海洋地震监测系统”, 属于海底网络方式的在线实时观测系统。如图1所示, 在线实时海洋地震观测场景图。

1.1 地震观测技术子系统

在海洋地震监测系统中, 海底地震观测设备可分海底地震观测设备(摆墩式和掩埋式)、海底钻孔内的地震观测装置^[7-8]和海底缆式地震观测设备(Ocean bottom cabled seismometers, 简称OBCS)^[6,9]

所组成。其中的OBCS是在海底通讯电缆技术的基础上发展起来的,利用海缆的连接头空间,内置地震观测设备;它具有系统集成度高、观测参量多的技术特点。海底地震观测设备包括水听器、

强震仪、宽频带地震仪及其它观测要素的传感器或设备;主要适用于海底地震活动性和海啸预警等。图2所示的是海底地震观测设备拓扑图。



图(a)是基于海洋浮标平台的海洋地震监测系统,图(b)是基于海底网络平台的海洋地震监测系统。

图1 在线实时海洋地震观测的场景图

Fig.1 Scenarios for online real-time marine seismic observation

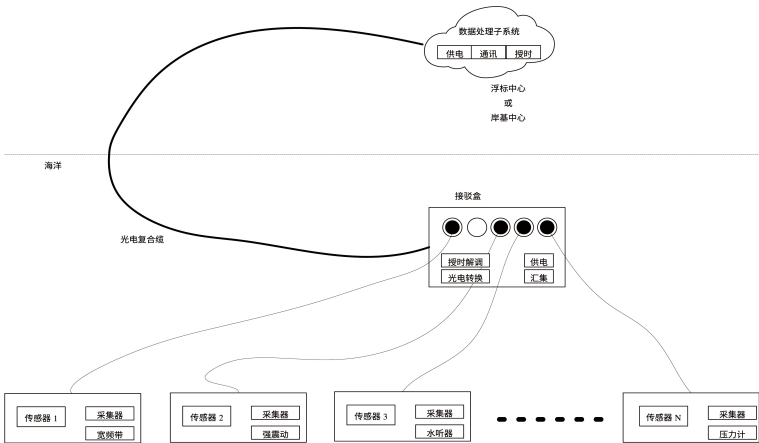


图2 地震观测技术子系统子系统的拓扑图

Fig.2 Topology diagram of the Seismic Observation Technology Subsystem

海底地震仪(Ocean Bottom Seismometer)是海底观测地震的专用科学仪器。其技术要求具有较高的信噪比,技术指标是频带范围、灵敏度等。海底地震观测仪器除受到“洋流、倾斜和海底耦合”等因素影响之外,还受设备功耗、观测数据的采集、储存与发送功能、授时与守时精度等功能约束;因此,要求具备“大动态范围(144 dB)”和“宽频带(0.001~50 Hz)”等技术特性,相应技术难度很大^[5,9-13]。强震仪(Strong motion seismograph)是指记录附近强地震在地面运动的自动触发式地震仪^[14]。其技术要求是仪器的本底噪声水平尽可能低,以提高其获取微弱信号的能力。因此,要求

设备的频带范围(DC~280 Hz),灵敏度(2.5 V/g),采用率(50 sps, 100 sps, 200 sps, 500 sps可调),动态范围(>150 dB)。水听器(Hydrophone)是指专用来接收水中的声信号的换能器,其技术要求是灵敏度高,一般需要匹配专门的前置放大电路。频带范围(0.1 Hz~5 kHz),灵敏度(-190 dB(re: 1 V/ μ Pa)),采用率(50 sps, 100 sps, 200 sps, 500 sps可调)。另外,倘若扩展水听器的低频频带和改善水听器的低频特性,可获得更高质量的水下低频声波信号。压力计(Pressure gauge)是指专用于接收由“海啸”或“内波”引起的水体中波动产生的压强变化信息,其主要技术要求是耐压深度(若

是深海中,需超过40 MPa耐压),高精度(一般需达到满量程的0.05%)以及高分辨率(一般需达到满量程的0.001%)。

在海洋地震监测项目的系统设计中,若集成地磁仪、温度测量仪,定向和姿态监测设备等;再拓展一些海洋化学和物理海洋学等学科的观测项目,可为海洋地球物理观测学科朝多学科交叉研究方向提供技术支撑。

1.2 岸基数据处理子系统

岸基数据处理子系统是海洋地震监测系统的信息集成平台所在,也是整个系统的控制中心。其主要功能是:一为浮标和所有海面 and 海底科学仪器实现实时监测、远程控制与运行管理;二是本地数据库和大容量数据服务系统,用于监测数据的流转、存储和分析以及可视化;三是实现与用户终端的数据交互。图3为岸基数据处理子系统的系统框图(或拓扑图)。

由图3可见,岸基数据处理子系统的主要组成

可分三个部分。其一,系统管理与控制软件:对浮标、数据传输系统、海底地震设备等具备运行状态、远程控制、数据采集、存储和可视化功能;其二,数据传输:该接口符合中国地震局Jopens6系统地震观测数据传输协议的要求,并提供所有监控数据的数据格式及协议;其三,数据展示界面:可实现系统状态数据显示、数据异常预警与报警、视频播放和存储等功能。所有的监测数据可在集控台显示,并可推送至移动用户终端,帮助工作人员全方位了解系统情况,并进行特殊情况处理。

1.3 通讯和供电子系统

通讯和供电子系统是海洋地震监测系统的信息传输、时钟服务和水下设备供电的综合平台,分“基于海洋浮标平台的海洋地震监测系统”,和“基于海底网络平台的海洋地震监测系统”两大类。这两类的主要特点可从信息传输方式区分,即“无线传输”和“有线传输”。

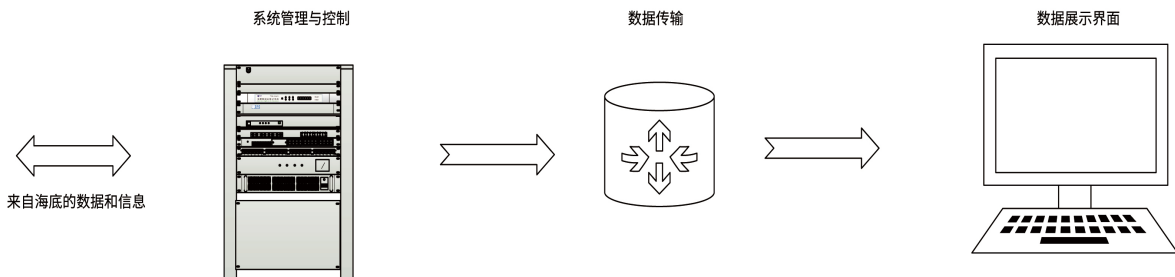


图3 岸基数据处理子系统的拓扑图

Fig.3 Topology diagram of shore-based data processing subsystems

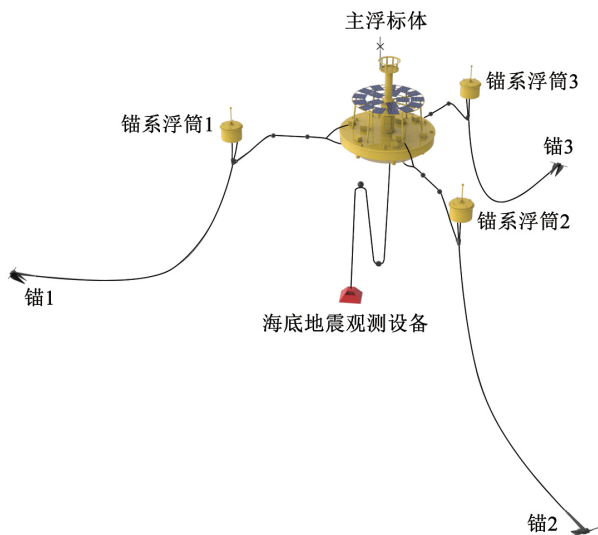


图4 十米直径的三锚式大型浮标示意图

Fig.4 Schematic diagram of a three-anchor large buoy with the diameter of 10-meter

1.3.1 基于海洋浮标平台的通讯和供电子系统

海洋资料浮标(简称浮标)是利用无动力漂浮载体获取海洋环境(水文、气象、生态和地球物理观测等)参数信息的无人值守自动观测系统。分锚系浮标(Moored buoy, MB)和漂流浮标(Drifting buoy, DB)两类。通常浮标尺寸越大,生存能力越强^[15]。从海洋地震监测系统的功耗、稳定性等综合指标需求考虑着手,基于海洋浮标平台的海洋地震监测系统建设的研究对象是大型浮标,通常直径大于等于十米的浮标为大型浮标^[16]。建设项目就是要将其锚泊在离岸较远(大于几十海里)的特定海域,进行地球物理等要素的在线实时监测;利用卫星或移动通信网络,将观测数据传输到岸基数据接收站,该系统需具备在特定海域连续观测、环境适应性强、无人值守全自动化、兼顾海面海底观测等特点。目前浮标种类很多,但浮标的稳定性和可靠性,是浮标正常工作极为重要的性能因素。为了克服恶劣环境对浮标监测系统的影响,提高浮标的适用性、可靠性及安全性,是以,海洋地震监测系统的锚系浮标配套选型至关重要^[17]。鉴于三锚式浮标具有较强的抗恶劣环境和限制海面标体的转动等能力;因而,具备既可保证海上

系统具有良好的通讯姿态,又可避免水下海缆与锚链的缠绕^[18-19]等优点,本文选三锚式大型浮标作为重点研究对象。图4为三锚式大型浮标示意图,其基本结构是由一个中心主浮标体和三个外围保护浮鼓及配套锚系组成。

当浮标位于海面上,与陆地的通讯方式通常选择无线传输。当处于有4G信号覆盖海域中,基于成本和功耗考虑,优先采用4G传输方式。当远离大陆或海岛时,尤其是4G信号无法覆盖的海域,只能选择卫星通讯方式。供电一般采用太阳能模式。通过充放电控制和内置大容量的蓄电池,组成一个不间断供电系统。浮标系统通过光电复合缆与水下的海底观测平台连接,其中的电芯用于供电,光芯用于通讯。

基于海洋浮标平台无线传输的无线传输系统的设计方案:部署1台4G路由器,4G路由器连接包括海底地震观测在内的所有水下设备;基于卫星通信网络,拨号进入行业内网;岸基数据处理子系统部署1台VPN汇聚路由器,提供通信网络接入。图5为基于海洋浮标平台的通讯和供电子系统的拓扑图。

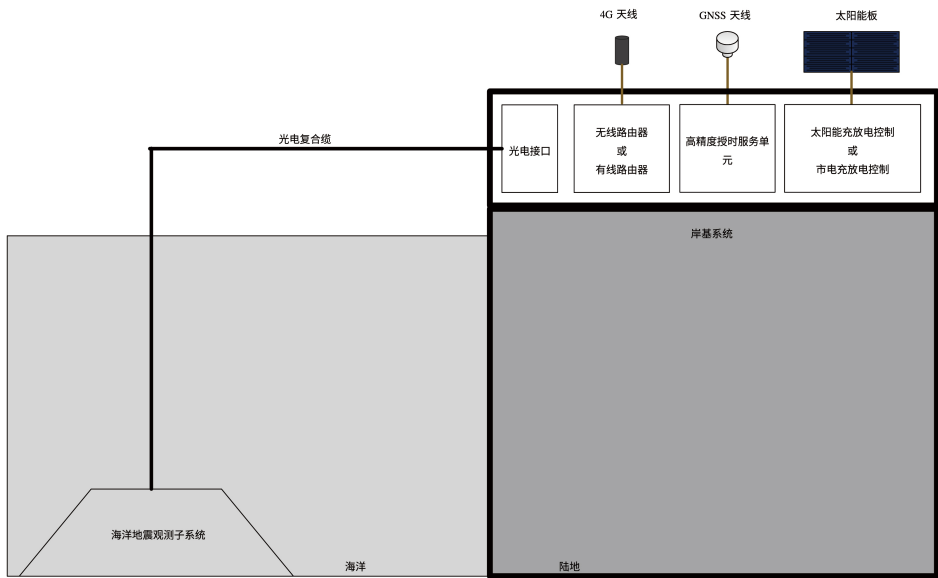


图5 基于海洋浮标平台的通讯和供电子系统的拓扑图

Fig.5 Topology diagram of the communication and electronic supply system based on the marine buoy platform

1.3.2 基于海底网络平台的通讯和供电子系统

利用海底电报电缆或光缆实现海洋地震观测子系统和岸基数据处理子系统时,常采用光电复合缆的方式连接,其中的电芯用于供电,光芯用于通讯。图6为基于海底网络平台的海洋地震监测

系统的拓扑图。

在海洋地震监测系统中,在海域部分,通讯和供电子系统项目建设中需部署1台接入交换机和1台接入汇聚点路由器。其中,前者下联地震观测技术子系统的地震专用设备,上联后者;接入

汇聚点路由器为海洋地震观测子系统的通信网络提供接入服务。在陆地部分，由于位于陆地岸基数据处理子系统获取供电和通讯等资源较为丰富和方便。在通讯方面，系统信息接入互联网和供

远端的数据中心访问时，既可选择4G无线方式也可选择有线光纤方式。在供电方面，即可以采用太阳能模式也可以采用市电模式，或两者兼顾，或与蓄电池组构成不间断供电系统。

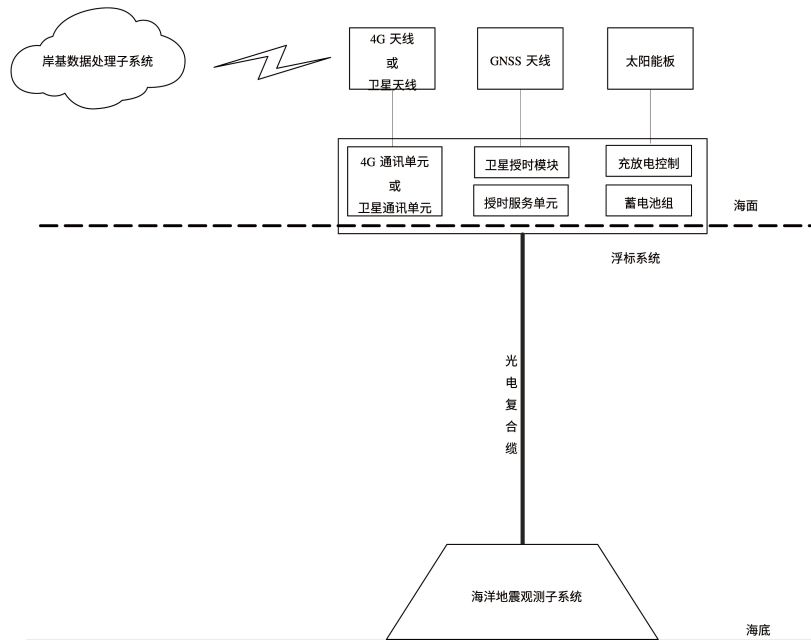


图6 基于海底网络平台的海洋地震监测系统的拓扑图

Fig.6 Topology diagram of marine seismic monitoring system based on submarine network platform

2 监测系统的安全分析

海洋地震监测系统安全问题是系统运维中一个重要内容，关乎到整个系统的稳定运行。由于海洋地震监测系统的主要观测要素在海床或海底上，与以离岸原位获取水文、气象等环境参数的海洋资料浮标系统会有明显的差异。例如，以“海洋浮标平台”为通讯和供电子系统时，除“地震观测技术子系统”和“通讯和供电子系统”两者自身安全之外，安全隐患在两者之间连接部位的安全隐患尤为突出。以“海底网络平台”为通讯和供电子系统时，主要安全隐患集中在海缆本身以及与“地震观测技术子系统”连接机构部件之中。

由于海洋地震监测系统的“地震观测技术子系统”和“通讯和供电子系统”深处于海洋环境之中，主要影响因素有：第一，高盐、高湿、甚至高温环境对于海面上的各类电器设备影响很大；第二，海洋生物和化学物质对位于水体和海底的各类设备具有较强的腐蚀性；第三，海洋中的风、浪、流等自然现象共同作用，容易导致浮标出现

倾覆、沉没、漂失等恶性事故，也会使得“水面设备破坏”、“锚泊系统与水下数据传输链”和“水下数据传输链与海底地震监测设备”之间连接出现变形、断裂等现象；尤其是对“海洋浮标平台”为通讯和供电子系统的海洋地震监测系统安全产生威胁；第四，频繁渔业活动容易对没有掩埋海底沉积物中的海缆产生严重隐患，在国内外有不少海缆断裂的案例与海洋拖网捕捞作业有关。此类案例，不胜枚举。

在基于海洋浮标平台的海洋地震监测系统中，由于海洋浮标是无人值守的，易受几种情形的破坏。例如，①被附近航行船只碰撞；②钓鱼船只的捕捞人员攀登或进入，甚至入室盗窃；③外界自然因素破坏^[20-21]。在基于海底网络平台的海洋地震监测系统中，倘若海底光缆没有妥善掩埋，裸露在海床或位于淤泥表层之中，容易被附近过往的拖网船只拉断或抛锚是砸断，导致水下信息链路中断^[22-23]。

与陆地相比，海洋地震监测系统的安全问题更为突出。为提高海洋地震监测系统的安全性并减少系统故障的发生概率，针对上述存在问题，研究分析其原因与机制，制定相应的系列安全保

障措施尤为重要。

3 监测系统的数据质量分析

海洋地震监测系统的观测质量问题是系统运维中另一个重要内容,也关系到整个建设项目的成败与否。在分析影响地震观测记录数据的质量的问题时,通常缘于地震设备结构设计、安装环境和安装方式是否得当;在评判观测记录数据的质量好坏时,最直接的方式就是分析观测记录中的信噪比大小或是背景噪声的程度。

与陆地地震观测不同,要将海域地震观测设备安装在基岩之上(或基岩之中)绝非易事。最直接的方案是利用钻探(类似大洋钻探),采用CORK或SCIMPI技术,将地震仪器放置在海底钻井中的基岩里,可大幅度提高监测地震的灵敏度和信噪比;海底深井的噪声水平比陆地上台站还低^[24-25]。但这样的方式,需要增加很大的经济成本。然而,

当直接将地震设备摆放在海床上时,观测记录数据背景噪声很大,测震的灵敏度大为降低,从而削弱了监测微小近震和远震的能力。这种情形属于因拾震传感器未能与基岩接触,所造成的与大地之间耦合不好的现象。如图7所示海底地震计的主要影响因素图。究其原因有二:一是由于海底沉积物具有低剪切强度、低承载力和含水量比较高等土力学特性。二是海底的洋流活跃,海底水热交换模式变化规律复杂,以及受设备处于倾斜状态影响^[26]。

长期以来,提高海洋地震监测系统的观测记录数据质量是一个具有挑战性的世界难题。针对上述存在问题,分析其原因与机制,制定一系列的质量保障措施。在条件允许的情况下,可通过实施钻探,将设备布放到井中的基岩里;在不具备条件的情况下,要从海底观测设备增强抗洋流能力和改善地震计与大地耦合关系着手,开展技术方法研究。

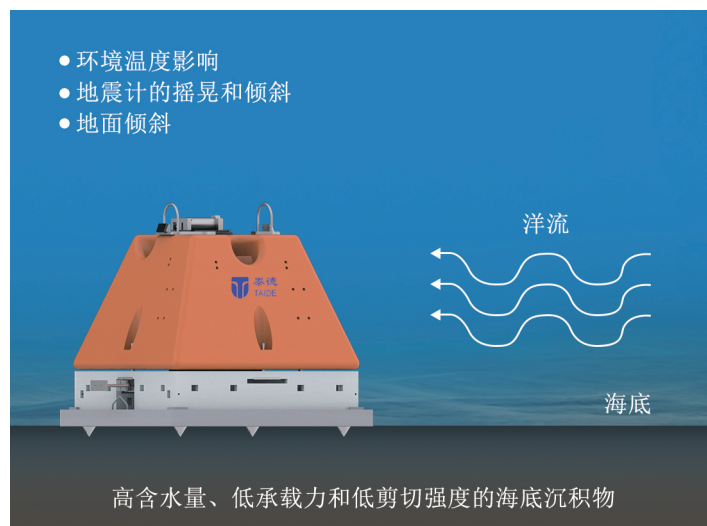


图7 海洋地震计在海底主要影响因素

Fig.7 Main factors affecting marine seismometers on the seabed

4 讨论

近本世纪以来,我国地震行业科技人员依托锚系浮标(上海地震局、福建地震局、珠海泰德与北京港震)、海底光缆(同济大学、珠海泰德、中科院声学所与三亚所)、海上风电项目(江苏地震局与北京港震)和海岛建设(广西地震局、上海地震局、海南地震局、珠海泰德和中科院南海所),一直探索将陆地地震监测网朝海洋深处拓展的海洋在线实时地震监测技术与方法。随着我国海洋

科技综合水平不断提高,地震监测与海洋技术之间的多学科交叉和多技术融合的不断深入,建设海洋地震监测系统的条件已具备,开展我国海域的地震监测工作也已趋于成熟。然而,由于海洋地震监测系统的建设不仅需要的投入资金大,而且还需要昂贵的运维费用。后者包括每年巡检,部件更换和故障排除等等。因此,不仅需要从可行性、可操作性和可靠性角度去审视项目建设的解决方案,还需要从最佳运维视角去审视安全保障和质量保障的各项措施。

4.1 基于海洋浮标平台的地震监测技术方案

选择海洋地震监测系统“通讯和供电子系统”的平台模式,关系到项目建设投资大小。从日本的S-NET^[9]和台湾的“妈祖”海底地震网络^[27]和建设中三亚—汕头南海北部海底网络^[28]的建设投资调研来看,结合我国海洋地震监测项目发展现状分析,建设基于海洋浮标平台的地震监测系统更具有操作性,实现该领域的技术突破更为可行。

从海洋浮标的实时传输数据容量、能源补给、建造材质以及观测要素的技术需求来看,在选择“通讯和供电子系统”采用海洋浮标平台时,采用直径为10 m、具有较强的抗恶劣环境和限制海面标体的转动等能力三锚式大型浮标可作为优选。另外,自2015年以来,美国SEA-BIRD公司研发了“在线实时电磁感应调制解调海洋锚泊系统(Real-Time Oceanography with Inductive Moorings and Inductive Modem Module)”,这种经济、灵活、可靠的解决方案也可作为今后另一种选择。这种方式的信号在海洋中的传输范围可达7000 m(SEA-BIRD SCIENTIFIC Application Note 92),具备将“基于浮标平台的海洋地震监测技术”拓展到深远海域的潜力;但该方式的信号传输速率不高,有待于进一步完善。

从海洋浮标的专业化功能划分,本文所提出的基于海洋浮标平台的地震监测系统建设方案,将是我国海洋资料浮标观测技术应用领域的一次新尝试/探索,是地球物理学和海洋科学的多学科交叉,地球物理观测、海洋技术和通讯技术的融合成果。

4.2 海洋地震监测的安全保障措施

对海洋地震监测项目建设各个阶段的安全保障措施要有针对性,区别对待。例如,在项目建设初期,为确保项目运维工作安全顺利,根据中华人民共和国海域使用管理权规定,需要向当地海事局申请海域使用权,办理报批程序,做到在特定海域布放“海洋地震监测系统”海床基和浮标观测设备合规合法。在设计过程中,充分考虑海上设备抗风、浪、流能力,要重视设计安全、材料安全、工程安全,确保结构从理论上满足功能需求之外,还要保障结构性能稳定、合理与有效。还必须考虑到突发事件、自然灾害、人为破坏等因素对海上设备的安全影响。在海洋浮标的浮体、标架、供电系统、防护设备和防污损措施等环节的设计加工制作以及材料挑选时,重点考虑各个部件材料符合质轻、防腐、防生物附着和耐用等特性,同时要确保外界荷

载在材料的强度范围内;注意加工工艺和精度,采用新技术新材料,提高海洋设备的防锈、防腐、耐压和水密能力;在海面设备上做清晰的安全警示标识。在设备布放前,一是布放场地需做场地勘查,确保海底观测可靠性;二是要对仪器设备进行系统全面测试,确保从浮标结构稳定性、电气可靠性、电气绝缘程度和网络安全性等各个环节均处于正常状态;三是制定详细布放实施方案和应急措施。在设备布放中,严格按照施工实施方案执行,由专人指挥、每个施工人员均需得到安全培训后上岗,明确各个岗位的安全职责、保持各个岗位之间的通讯顺畅,要注意安全保护措施。确保施工船只和辅助设备均处于良好的工作状态。在施工过程中,海上设备会面临疲劳、磨损、损耗等问题,要求现场人员及时进行检查评估,从安全的角度制定维护、修补或拆除等方案。在海缆布设的项目中,需要通过铺缆机开挖到一定深度,再利用ROV将OBCS掩埋到海底沉积物之中。以防止拖网船作业时将海缆及OBCS拉断,导致系统的崩溃。在设备布放后,要对设备做全面检测后退场。事后,要在附近海域的城镇做一下进行科普宣传,增强当地民众对于海上设备保护意识和法律意识。

基于海洋地震检测系统的安全因素分析,除这个系统的设计与选材之外,还应着重关注“锚泊系统与水下数据传输链”和“水下数据传输链与海底地震监测设备”之间连接技术细节,要制定具体的技术保障措施。

4.3 海洋地震监测的质量保障措施

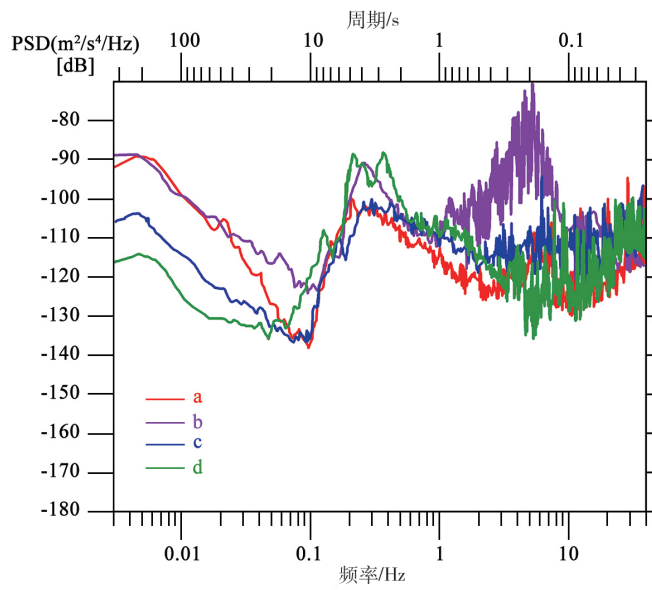
降低或减弱对海洋地震监测系统的采集信息质量几个影响因素的作用,可提高海底地震观测信息的数据质量。因此,在制定海洋地震监测的质量保障措施时,重点在于地震观测技术子系统。除了选用高性能的专业地震监测设备和勘选好场址两个必要条件之外,还需重点关注地震观测技术子系统的地震设备结构设计、加工制作和安装方式等技术环节。具体的保障措施可从以下两方面着手:

从图6可知,海底洋流影响海底地震观测记录质量主要因素之一。在海底地震设备结构设计与加工制作时,要做好观测传感器与海底洋流的隔离措施。例如,一是海底观测装置外壳与内部机构要分离,其中内部机构包括地震计、强震仪等高灵敏度监测设备,减弱受外界环境变化的影响程度;二是仪器内部结构要到紧凑和坚固,在经受强大外力影响后,仍不改变原有技术性能;三是仪器底座设计

和加工要做到容易与海底良好的耦合关系、确保设备水平。倘若采用CORK技术,观测仪器要安装在海底基岩中。

海底地震监测设备的安装方式方法选择和实施是决定海底地震观测记录质量的另一个主要因素。图7是四种不同安装条件下的垂直分量的背景噪声比较^[26]。尤其是,将同一类型的地震设备不同的安装方式(安放在海底—掩埋在海底—掩埋在海底再加不锈钢盖罩住),国外学者在研究海底地震背景噪声特征时认为,频段为0.05~0.5 Hz(20~2 s)信号源为海陆耦合作用所致,也与海流有关;并可分两个频带:单频地脉动(single-frequency microseisms),频率范围为0.05~0.1 Hz(20~10 s);双频地脉动(double-frequency microseism),频率范围为

0.1~0.5 Hz(10~2 s)^[29~30]。其中的双频地脉动信号又可再分为二类:长周期信号的能量集中在0.1~0.2 Hz(10~5 s),声源主要产自海岸边;短周期信号的能量集中在0.2~0.5 Hz(5~2 s),声源主要来自深远海域^[32]。小于1 s频段信号大多数属于近源噪声。显然,图8中的第四种(d)地震计在海底的安装方式,起到一定的抗洋流和减低海底噪声的效果最佳。2023年11月,广州海洋地质调查局和珠海泰德企业有限公司联手,在珠江口采用5台TDOBN-53节点式海底地震计进行海底背景噪声观测实验,其结果也验证采用“将OBN掩埋和再用罩子”的方法,可提高海底地震信号的信噪比(相关成果待发表)。



A:把地震仪装在一个钛球里,并放在海底;B:把地震计装在一个圆柱形容器中,并放在海底;c:把地震计被安置在一个圆柱形容器中,掩埋在沉积物中;D:在掩埋地震计上,再放一个不锈钢盖罩住。

图8 四种不同安装条件下的背景噪声比较

Fig.8 Comparison of background noise under four different installation conditions

5 结论

加强海洋地震监测技术方法研究可提高我国海域的防灾减灾能力、促进海洋经济发展,并为包括大地构造、地球动力学等海洋地学基础研究提供宝贵资料。通过梳理国内外海洋地震监测技术现状,结合现代海洋资料浮标与海底光缆技术特点,重点探讨适合我国现今条件下的海洋地震监测技术、安全和质量保障措施等,得到以下几点认识:

根据我国现今海洋地震监测项目建设投资和

条件,建设基于海洋浮标平台的地震监测系统更具可行性、可操作性,采用直径三锚式大型浮标作为“通讯和供电子系统”较为适宜。该项工作是我国海洋资料浮标观测技术应用领域的一个创新。

海洋地震监测项目的安全保障关系到整个系统的稳定运行,要制定和落实好各项安全保障措施,需特别关注“通讯和供电子系统”和“地震观测技术子系统”之间连接技术细节。

海洋地震监测项目质量保障,关系到整个系统是否能成功运行。因此,要制定和落实好各项质量保障措施,尤其在“地震观测技术子系统”

海底的安装中,要注意地震设备的防洋流和与大地耦合这两个重要环节。

致谢:本项目为广东省珠海市泰德企业邮箱公司海洋技术领域院士工作站的科研成果。感谢珠海泰德企业有限公司总工程师罗新恒教授等为本文提出了有益建议和帮助,南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)罗敏哲工程师参与论文部分研究工作,中山大学海洋工程学院廖佳华同学为本文清绘了部分插图,审稿专家为本文提出了宝贵修改意见,作者在此一并谨致谢忱。

参考文献

- [1] 张少泉. 印度洋“12·26”百日祭——地震与海啸科普工作札记[J]. 国际地震动态, 2005, (3): 37-40.
- [2] 李姜, 万永革. 2011年日本9.0级地震前后应力场变化[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(3): 45-51.
- [3] 卢振恒. 日本海底地震观测现状与进展[J]. 地震学刊, 1999(4): 54-63.
- [4] 上海海洋科技研究中心(筹)与海洋地质国家重点实验室(同济大学). 海底观测——科学与技术的结合[M]. 上海: 同济大学出版社, 2012.
- [5] 周公威, 庄灿涛, 郝春月, 等. 海洋半球台网计划(OHP)与海底地震观测系统的发展[J]. 西北地震学报, 2005, 27(S1): 6-13.
- [6] Shinohara M, Kanazawa T, Yamada T, et al. New compact ocean bottom cabled seismometer system deployed in the Japan Sea[J]. Marine Geophysical Research, 2014(35): 231-242.
- [7] Becker K, Davis E E. A review of CORK designs and operations during the Ocean Drilling Program[J]. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, 2005(301): 1-28.
- [8] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2007(3): 125-130+122
- [9] Mochizuki M, Uehira K, Kanazawa T, et al. S-Net project: performance of a large-scale seafloor observation network for preventing and reducing seismic and tsunami disasters[C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, Japan: IEEE, 2018.
- [10] 连尉平, 方国庆, 杨大克, 等. 国际海洋地震观测最新进展和我国海洋地震观测发展探讨[J]. 山西地震, 2009, (3): 32-37, 42.
- [11] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. 科学通报. 2011, 56(22): 1839-1845.
- [12] 黎珠博, 潘飞儒. 海底地震观测技术现状与展望[J]. 华北地震科学, 2015, 33(3): 56-63.
- [13] 杨程, 解全才, 马强, 等. 海底地震监测网络发展现状[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(2): 161-167.
- [14] 李山有. 强震动观测的应用[J]. 东北地震研究, 2004, (4): 64-74.
- [15] 吴明东, 盛松伟, 张亚群, 等. 海洋波浪能浮标发展现状及前景[J]. 新能源进展, 2021, 9(1): 42-47.
- [16] 周保成, 黄桦, 张新文, 等. 论南海区水文气象浮标管理[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(1): 132-134.
- [17] 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 1-20.
- [18] 白强, 袁新, 杨永春, 等. 三锚浮标系统研究[J]. 海洋技术, 2007, 26(4): 27-29.
- [19] 高洋洋, 胡阳宁, 王立忠, 等. 三锚系大型浮标运动响应特性数值研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(6): 124-138.
- [20] 徐文锵. 浮标系统的安全与数据的可信度[J]. 海洋技术, 1991, 10(3): 84-87.
- [21] 赵聪蛟, 周燕. 国内海洋浮标监测系统研究概况[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(11): 13-18.
- [22] 施炎, 李文川, 丛丕宇. 海底光缆风险警告解决方案[J]. 电信技术, 2018, 536(11): 54-58.
- [23] 刘莉莉, 白冰蒙, 林业茂, 等. 琼州海峡海底光缆故障分析与对策建议[J]. 通信与信息技术, 2023, 263(3): 93-96.
- [24] Fisher A T, Urabe T, Klaus A, et al. IODP Expedition 301 installs three borehole crustal observatories, prepares for three-dimensional, cross-hole experiments in the northeastern Pacific Ocean[J]. Scientific Drilling, 2005(1): 6-11.
- [25] Shinohara M, Araki E, Kanazawa T, et al. Deep-sea borehole seismological observatories in the Western Pacific: temporal variation of seismic noise level[J]. Annals of Geophysics, 2006, 49(2/3): 625-641.
- [26] Kaneko S, Araki E, Kawaguchi K, et al. Installation method of high-quality seismic observation in the seafloor[C]// OCEANS 2009-EUROPE. Bremen, Germany: IEEE, 2009: 1-5.
- [27] Hsiao N C, Lin T W, Hsu S K, et al. Improvement of earthquake locations with the Marine Cable Hosted Observatory (MACHO) offshore NE Taiwan[J]. Marine Geophysical Research, 2014(35): 327-336.
- [28] 李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 海底观测网技术进展与发展趋势[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 33-35.
- [29] Longuet-Higgins M S. A theory of the origin of microseisms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1950, 243(857): 1-35.
- [30] Hasselmann K. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. Reviews of Geophysics, 1963, 1(2): 177-210.
- [31] Cicconi G, Dagnino I, Eva C. Comparative spectra of microseisms and swell in the Ligurian Sea[J]. Dev Solid Earth Geophys, 1983(15): 237-241.
- [32] Bromirski P D, Duennebie F K, Stephen R A. Mid-ocean microseisms[J/OL]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005[2024-02-10]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54886330>. DOI: 10.1029/2004GC000768.