

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20251228004

江苏海洋地震台网建设及其观测数据初探*

王恒知, 周昱辰, 何奕成, 卢永, 潘颖, 张敏, 张扬,
官杰, 李正楷, 孙业君, 孙思聪, 王俊

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 基于海上风电工程建成了涵盖测震、强震动、电磁和GNSS等多学科交叉、多技术应用、多手段融合的江苏近海地震综合观测台网。以中国台湾宜兰县海域6.6级地震记录为示例, 分析了各类典型台站获取的地震记录, 结果表明: 海上风电工程平台站、海底站以及DAS站均能获取清晰的地震记录, 震相清晰, 能够准确识别P波和S波到时信息。其中, 平台站加速度记录时程和频谱分析表明, 海上风电工程结构对地震动具有显著的放大作用, 能够有效反应工程结构在地震作用下的动力响应特征。实时传输、高采样率的海底电磁观测数据有效率逐步提升。通过对观测数据的初步分析, 验证了基于海上风电工程的近海地震观测技术方案可行, 观测数据质量可靠, 提升了我省海洋地震监测台网孔径, 拓展了海洋地震安全服务范围, 为下一步开展海上风电现地预警和区域预警相融合的地震预警研究以及结构安全评估研究奠定了技术基础。

关键词: 海上风电工程; 海底地震观测; 海底电磁观测; 峰值加速度; 卓越频率

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1532-07

Construction of Jiangsu Offshore Seismic Network and Preliminary Analysis of Its Observation Data

WANG Hengzhi, ZHOU Yuchen, HE Yicheng, LU Yong, PAN Ying, ZHANG Min,
ZHANG Yang, GONG Jie, LI Zhengkai, SUN Yejun, SUN Sicong, WANG Jun
(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on offshore wind power projects, a comprehensive offshore seismic observation network was constructed in Jiangsu, integrating multiple disciplines, technologies, and methodologies, and covering seismometry, strong-motion monitoring, electromagnetism, and GNSS. Taking the records of the $M_{6.6}$ earthquake in the offshore area of Yilan County, Taiwan, China as a case study, this study analyzed seismic records collected by various typical stations. The results showed that offshore wind power platform stations, seafloor stations, and DAS stations were all capable of capturing clear seismic records with distinct phases, enabling accurate identification of P- and S-wave arrival times. In particular, time-history and spectrum analyses of acceleration records from platform stations

* 收稿日期: 2025-12-28; 修回日期: 2026-01-05

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH25012C)、江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术项目(BE2023082)、海洋地震监测与重大工程地震安全服务创新团队(2023)资助

作者简介: 王恒知(1984—), 男, 高级工程师。主要从事地震监测预警相关研究。E-mail: jsdzwhz@126.com

通信作者: 卢永(1973—), 男, 正高级工程师。主要从事地震仪器研发和地球物理监测相关研究。

E-mail: njluyong@163.com

indicated that offshore wind power project structures exerted a significant amplification effect on ground motions, and could effectively reflect the dynamic response characteristics of the engineering structures under seismic action. The validity rate of real-time, high-sampling-rate seafloor electromagnetic observation data was steadily improving. Preliminary analysis of the observation data verified the feasibility of the offshore seismic observation technical scheme based on offshore wind power projects and the reliability of the observation data quality. This scheme expanded the coverage of Jiangsu Province's offshore seismic monitoring network and extended the scope of offshore seismic safety services, thereby laying a solid technical foundation for future research on the integration of on-site early warning and regional seismic early warning as well as structural safety assessment for offshore wind power facilities.

Keywords: offshore wind power project; seafloor seismic observation; seafloor electromagnetic observation; peak acceleration; dominant frequency

0 引言

江苏东邻黄海,海岸线全长954公里,以滩涂式浅海地形为主。在距盐城海岸线约20至30公里的海域,发育有北西向的苏北滨海断裂,全长270公里,约占江苏海岸线总长的三分之一,是一条至今还在活动的大断裂^[1]。历史记录显示,南黄海海域共记录到5级以上地震54次,其中6~6.9级地震18次,7级以上地震1次,呈现震级大、频次高的特点^[2]。

江苏近海风能资源丰富,是国家清洁能源海上风电重点区域,海上风电装机规模位居全国首位^[3]。自2022年以来,江苏省地震局与三峡集团江苏分公司等多家海上风电企业合作,依托海上风电平台建设了实时传输的海上风电工程平台地震观测站^[4]。2025年,在此基础上进一步建成了实时传输的海底地震观测站和海底电磁观测站,并利用海上风电场海底光缆搭建了跨断层的分布式光纤(DAS)地震监测台阵,共同构成了江苏海洋地震综合观测台网。台网建成后,我省海洋地震监测台网孔径向海域扩展80公里,显著提升了海洋地震监测能力。

1 台网设计

江苏海洋地震台网由四类站点组成(图1),分别是10个海上工程平台地震观测站、2个海底地震观测站、3个DAS站和3个岛礁台站,主要分布在中

强地震活动强烈的苏北滨海断裂的中南段。其中,海上工程平台站、海底站和DAS站均依托海上风电工程基础设施布设地震观测设备。

平台站主要分布在盐城和南通海域,站址优先选址海上风电升压站、高抗站或者换流站等稳固的工程平台,观测仪器安装在平台首层甲板主体立柱附近,并加装防护罩进行密封防护。海底站布设在两个海上风电升压站附近50米范围内的海域,选址于海床平坦、远离海底光缆等设施的区域。DAS站沿苏北滨海断裂由北向南布设,分别利用盐城滨海、大丰和南通如东的海上风电场海底光缆开展超密集海底地震活动监测。岛礁站分别为连云港前三岛台、连岛台和南通阳光岛台,

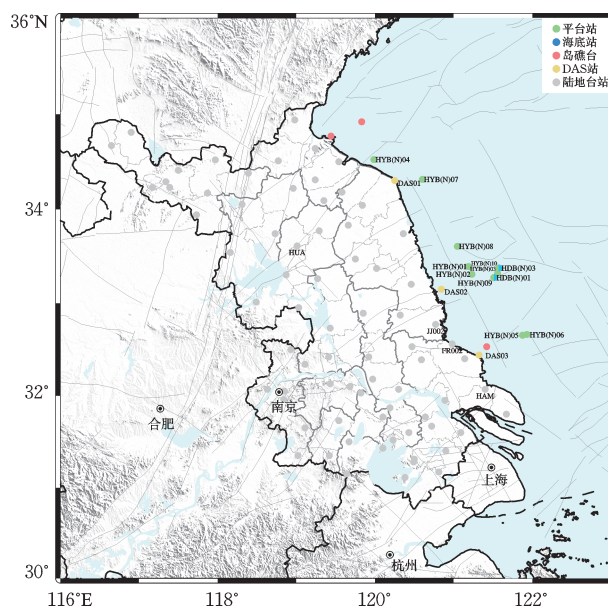


图1 江苏海洋地震台站分布

Fig.1 Distribution of offshore seismic stations in Jiangsu

属于国家地震烈度速报与预警工程江苏子项目和江苏省地震烈度速报与预警工程所建设的测震基准站。

2 系统构成

2025年12月,基于海上风电工程的海底地震观测站成功完成布放,初步构建了立体、实时、长期的

海洋地震综合观测体系,观测系统构成见图2。江苏海洋地震台网主要以测震和强震动观测为主,同时辅助海洋电磁、地壳形变和分布式声波传感等多种观测手段。海上风电工程平台站主要配置一体化宽频带地震仪和MEMS强震仪,部分站点增设了北斗/GNSS观测设备。观测数据通过VPN路由器经海底光缆接入陆地集控中心公网,建立虚拟专线实时传输至测震(预警)台网中心。

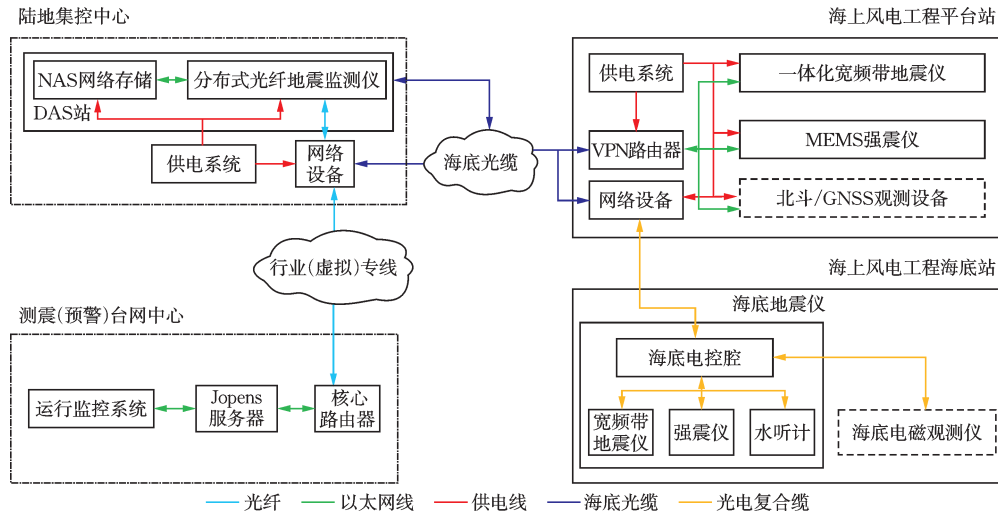


图2 江苏海洋地震台网观测系统构成

Fig.2 Composition of offshore seismic observation network in Jiangsu

海上风电工程海底站均配置海底宽频带地震仪、强震仪和水听计,且每类仪器均配备主、备两套设备。其中,1个海底站还增设了1套海底电磁观测仪,包含磁通门传感器、感应式磁传感器和电场传感器。海底地震观测数据通过光电复合缆接入升压站通信节点,经海底光缆专线传输到陆地集控中心,最终通过行业专线实时传输至测震(预警)台网中心。

DAS站配置分布式光纤地震监测仪和NAS网络存储器,安装在海上风电陆地集控中心机房内,观测数据本地存储,通过集控中心公网实现远程监控和管理。下一步,拟通过基于HTTP协议的采集处理转发系统,将多道数据以特定台站编码实时接入JOPENS系统,实现数据的连续稳定传输。

3 观测数据和分析

3.1 地震数据分析

截至目前,台网运行稳定,获得了最长36个月的连续波形数据,记录到近30次震相清晰的近海海

域地震,以及台湾花莲海域M7.3等多次远场大震。为了检验台网地震观测效能,本文以2025年12月27日23时5分中国台湾宜兰县海域6.6级远震事件为示例,分别计算平台站、海底站和DAS站的地震记录,并与2个陆地基准站和基本站获取的记录进行对比分析,选取的典型海洋台站信息见表1,站点分布见图1。

3.1.1 速度记录分析

此次地震平台站和海底站均获取有效地震记录,地震仪的频带范围均为60 s~50 Hz,采样率为100 Hz,图3展示了6个不同类型站点的去线性化趋势和波形尖灭后的速度时程波形。从P波到时前的噪声水平看,相比与平台站,海底站噪声水平明显偏低,尤其是两个水平方向上。从震相清晰程度上看,尽管海域环境噪声有所不同,但平台站和海底站的震相记录依然清晰,可准确识别出P波和S波的初动时刻。通过与陆地测震台站记录对比可见,海域站点的波形记录质量良好,主要震相特征与陆地台站具有较好的可比性,验证了该观测系统的有效性。

表 1 海洋台站信息

Table 1 Information of offshore stations

序号	台站代码	观测类型	设备型号	台站类别	震中距/km
1	HDB01	测震	GL-OBS60	海底站	959
2	HDN01	强震动	GL-OBSA4	海底站	
3	HDB03	测震	GL-OBS60	海底站	970
4	HDN03	强震动	GL-OBSA4	海底站	
5	DAS02	光纤传感	ZD-DAS	DAS站	951
6	HYB05	测震	GL-PCS60	平台站	889
7	HYN05	强震动	REMOS-SIT4S	平台站	
8	HYB06	测震	GL-PCS60	平台站	890
9	HYN06	强震动	REMOS-SIT4S	平台站	
10	HUA	测震	EDAS-24GN+GL-S60B	陆地基准站	1 038
11	HAM	测震	EDAS-24GN+GL-S60B	陆地基准站	826
12	FR002	强震动	EDAS-24GN+JS-A2	陆地基本站	885
13	JJ002	强震动	EDAS-24GN+GL-A4	陆地基本站	910

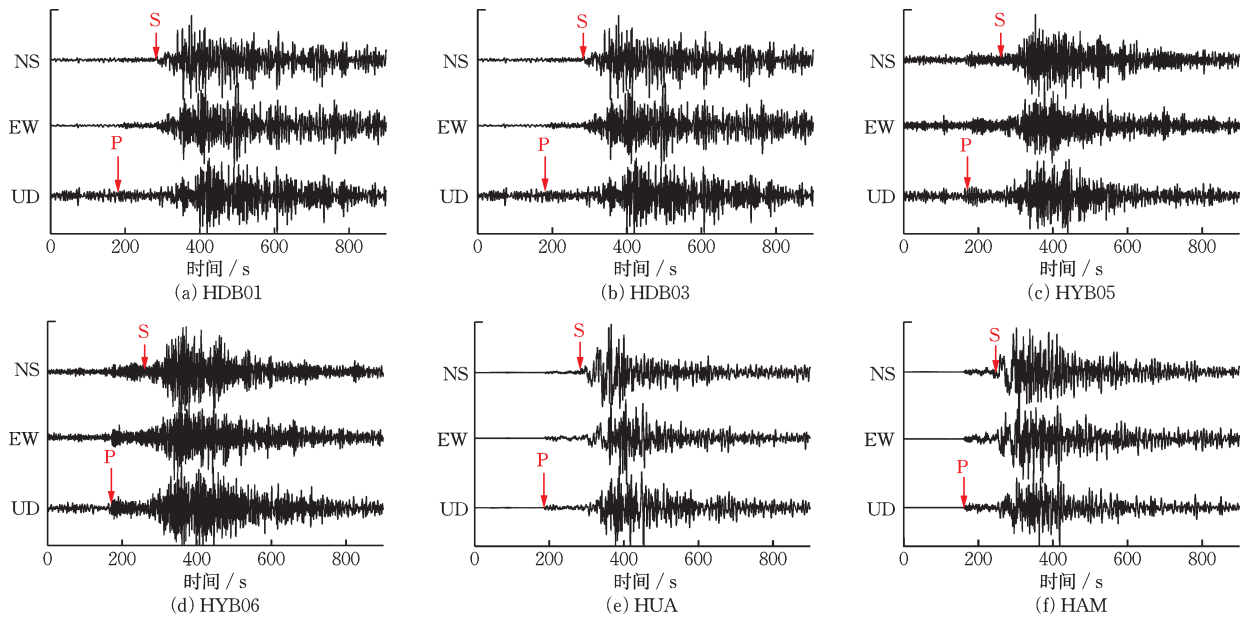


图 3 中国台湾宜兰县海域 6.6 级地震速度记录

Fig.3 Velocity records of $M_{6.6}$ earthquake in offshore area of Yilan County, Taiwan, China

3.1.2 加速度记录分析

选取平台站、海底站和陆地基本站的典型加速度时程,首先对原始数据进行零漂校正和 0.1~

20 Hz 的带通滤波处理,计算加速度记录振幅谱,并提取峰值加速度(PGA)和卓越频率,结果如表 2 所示。从时域分析结果可以看出,三类台站的 PGA 总

表 2 各台站地震记录峰值加速度和卓越频率

Table 2 Peak accelerations and dominant frequencies of seismic records at different stations

序号	台站代码	峰值加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)			卓越频率/Hz		
		东西分量	北南分量	垂直分量	东西分量	北南分量	垂直分量
1	HDN01	0.155	0.177	0.067	0.24	0.37	0.30
2	HDN03	0.171	0.196	0.063	0.28	0.38	0.28
3	HYN05	0.308	0.322	0.106	0.26/1.27	0.24/1.27	0.45
4	HYN06	0.547	0.589	0.104	0.20/1.22	0.21/1.22	0.39/1.20
5	JJ002	0.286	0.337	0.118	0.22	0.22	0.26
6	FR002	0.176	0.196	0.100	0.22	0.22	0.42

体处于相近量级,其中,平台站HYN06北南分量的PGA值最大,达到 0.589 cm/s^2 ;海底站的PGA值最小,其水平分量PGA值均低于 0.2 cm/s^2 。这一分布特征表明,海上工程结构对地震动具有一定的放大效应,而海底环境则对地震波能量具有吸收和衰

减作用。此外,处理后的平台站和海底站加速度记录可清晰的识别出P波和S波震相(图4)。

从频域分析结果(图5)可以看出,海底站与陆地基本站的卓越频率集中于 $0.22\sim 0.42\text{ Hz}$,频率分布相近,频谱形态平缓。相比之下,平台站水平向

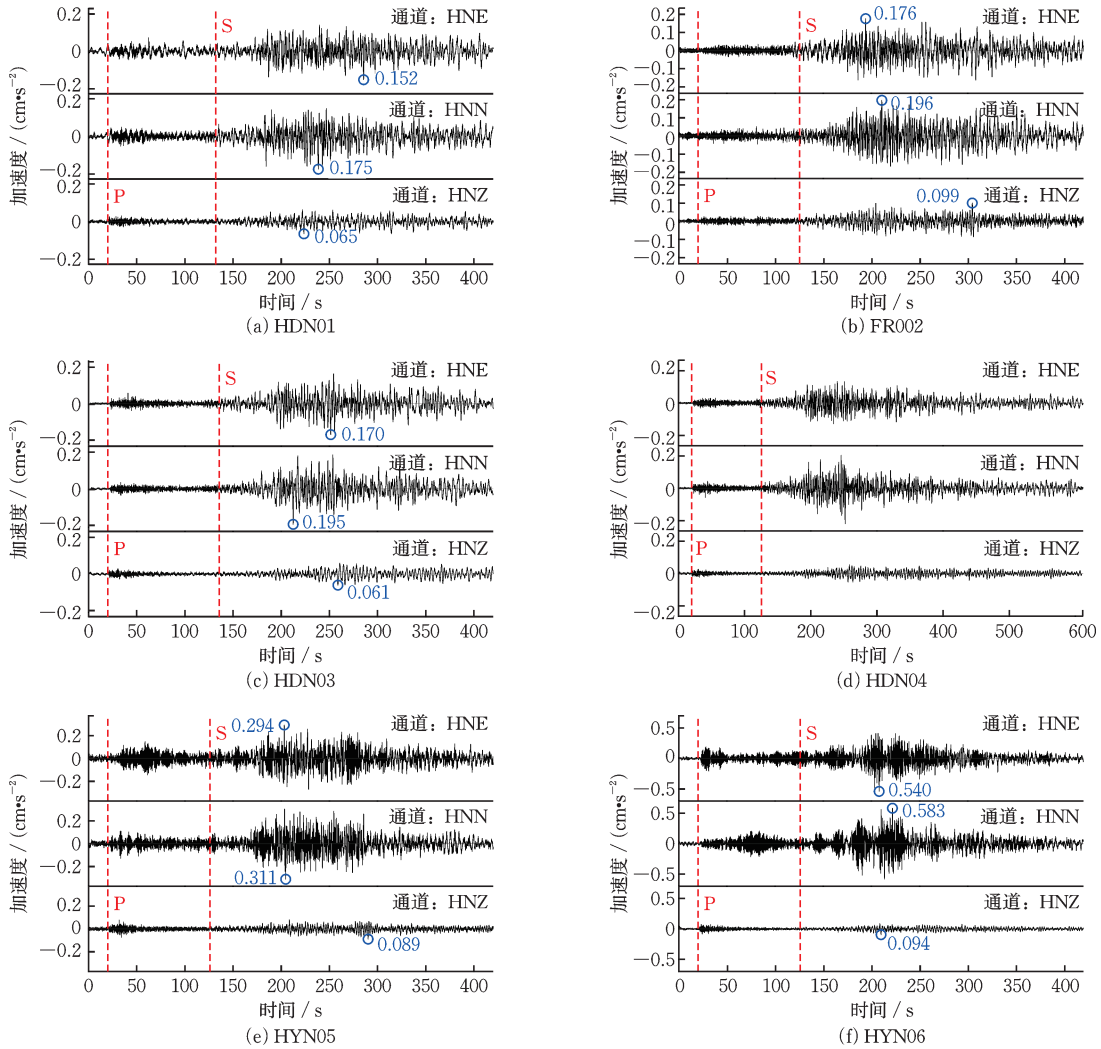


图4 中国台湾宜兰县海域6.6级地震加速度记录

Fig.4 Acceleration records of M6.6 earthquake in offshore area of Yilan County, Taiwan, China

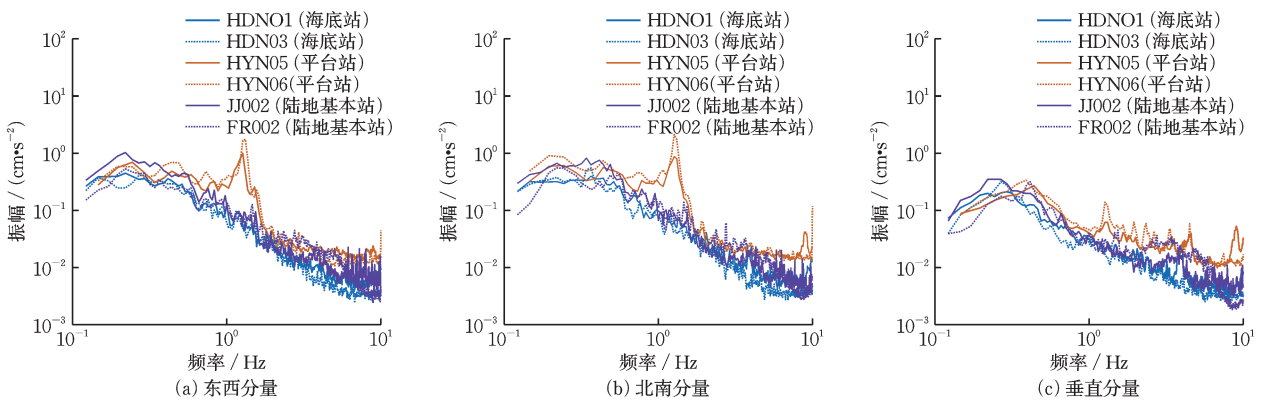


图5 中国台湾宜兰县海域6.6级地震加速度记录振幅谱

Fig.5 Amplitude spectra of acceleration records of M6.6 earthquake in offshore area of Yilan County, Taiwan, China

卓越频率具有明显的双峰特征,垂直向在1~10 Hz 高频范围内出现多峰现象,三个分向在1.2~1.3 Hz 范围内均存在尖峰,且振幅明显高于其他台站,根据资料显示,该段频率与风电平台的自振频率相近^[5-6],因此平台桩基结构对地震动具有显著的动力放大效应。

综合幅值与频谱特征可知,在地震动幅值水平相近的前提下,不同台站的地震动响应差异主要体现在频率分布和频谱放大特性上,长周期地震动作用下海上升压站结构的动力响应普遍大于普通地震动的作用结果^[7]。平台站表现出的高频卓越频率及显著水平向振幅放大,反映了桩基结构与场地耦合作用下的典型结构动力响应特征。

3.1.3 DAS记录分析

截取如东 DAS02站第219道(离岸1公里)和第3409道(离岸28公里)的记录,经1 Hz的低通滤波处理后,记录波形清晰(图6),可以准确地识别出此次地震的P波和S波震相,3409道幅值稍大于第219道,可能受到海浪和潮汐影响,背景噪声变大。计算其振幅谱(图7),卓越频率在0.3 Hz左右,与海

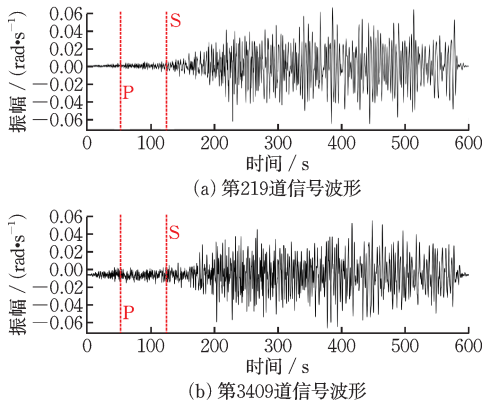


图6 中国台湾宜兰县海域6.6级地震DAS记录

Fig.6 DAS records of M6.6 earthquake in offshore area of Yilan County, Taiwan, China

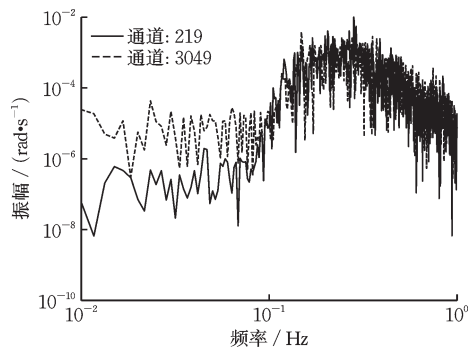


图7 中国台湾宜兰县海域6.6级地震DAS记录振幅谱

Fig.7 Amplitude spectrum of DAS records of M6.6 earthquake in offshore area of Yilan County, Taiwan, China

底站的加速记录频谱特征一致。总体来说,DAS站记录与海底站、平台站以及陆地台站记录波形对比具有较好的一致性。

3.2 地磁数据分析

国内首个海底固定、高采样率、实时连续传输的电磁仪于2025年12月底完成布放,本文截取了2026年1月3日12:00至24:00的磁通门观测数据,采样率200 Hz,从图8可以看出目前观测数据已逐渐趋于稳定,日变幅度在50~150 nT左右,噪声干扰相对陆地台站较高。这可能是由于仪器在海底布设时间较短、与海底耦合尚未稳定有关,同时观测也受运动海水影响,包括高频的风浪和低频的潮汐浪潮干扰。从功率谱(图9)上可以看出,在0.1~0.3 Hz频段附近幅值显著增大,这与运动海水的频率相符^[8]。

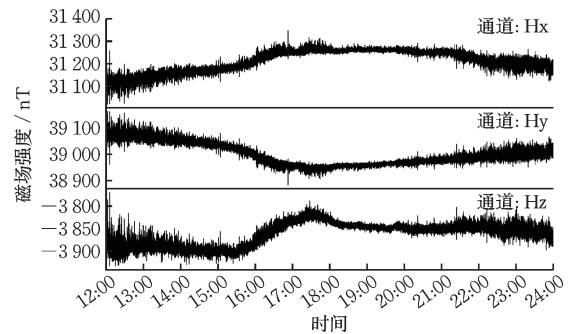


图8 海底磁通门观测时间序列

Fig.8 Time series of seafloor fluxgate observations

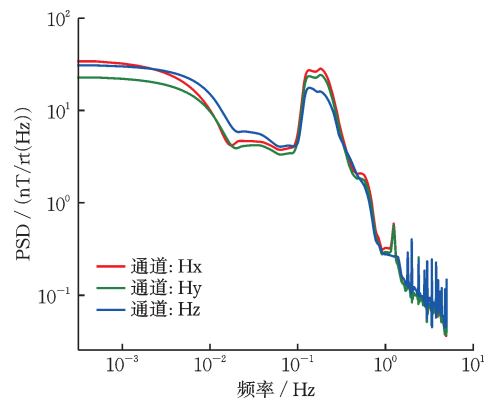


图9 海底磁场功率谱密度

Fig.9 Seafloor magnetic field power spectral density

4 结论和展望

基于海上风电工程的江苏海洋地震综合观测台网,创新了海洋地震观测技术,集成了测震、强震

动、电磁和GNSS等多种观测手段。通过计算分析各类台站获取的中国台湾宜兰县海域6.6级远震记录,结果显示地震记录震相清晰,加速度记录能够反应工程结构在地震作用下的地震动响应特征。近海高采样、多分量实时传输的海底电磁观测数据连续率和有效率高。这些结果充分说明,建设海上风电工程平台站和海底站的海洋地震观测模式切实可行,有效解决了制约海洋地震监测的“供电、通信、运维”三大难题,显著降低了建设与维护成本,为沿海各省市拓展海洋地震观测开辟了一条全新路径。下一步,我们将继续完善海洋地震观测业务体系建设,深化台网数据应用研究,开展融合海上风电现地预警与区域预警的地震预警技术研究,研发海上风电工程结构安全监测与评估系统,进一步拓展海洋地震安全服务范围。

参考文献:

- [1] 李旭东,刘绍文,王丽. 江苏—南黄海地区地震活动时空分布特征及其孕震构造分析[J]. 高校地质学报, 2018, 24(4): 551-562.
Li X D, Liu S W, Wang L. Spatiotemporal pattern of earthquake activities and seismotectonics in Jiangsu and Adjacent Southern Yellow Sea area[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(4): 551-562. (in Chinese)
- [2] 王恩惠,张广伟,谢卓娟,等. 盐城地区小震精定位及构造意义[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2):461-466.
Wang E H, Zhang E H, Xie Z J, et al. Precise relocation of small earthquakes in the Yangcheng area and associated tectonic implications[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2):461-466. (in Chinese)
- [3] 李志川,胡鹏,马佳星,等. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 229-236.
Li Z C, Hu P, Ma J X, et al. Analysis and prospect of offshore wind power development in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 229-236. (in Chinese)
- [4] 孙业君,何奕成,王俊,等. 海上风电平台地震监测实验站记录的南黄海M3.8地震初探[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1351-1353.
Sun Y J, He Y C, Wang J, et al. A preliminary investigation of an M3.8 earthquake in the South Yellow Sea recorded by an experimental offshore wind power platform based seismic station[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1351-1353. (in Chinese)
- [5] Wang J, Zheng J R, Sun Y J, et al. Characteristics of ambient seismic noise recorded at offshore wind turbine platform monitoring stations[J]. Earthquake Research Advances, 2025, Doi: 10.1016/j.eqrea.2025.100440.
- [6] 朱瑞军,何先龙,金波,等. 海上升压站振动测试和分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3):230-234.
Zhu R J, He X L, Jin B, et al. Vibration test and analysis of ocean booster stations[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(3): 230-234. (in Chinese)
- [7] 杜鹏程,张富有,葛凯,等. 长周期地震动作用下海上升压站结构动力响应分析[J]. 河南科学, 2023, 41(2): 248-255.
Du P C, Zhang F Y, Ge K, et al. Dynamic response of offshore substation structure under long-period ground motion[J]. Hennan Science, 2023, 41(2): 248-255. (in Chinese)
- [8] 宫杰,孙业君,郑江蓉,等. 江苏海洋地震台站建设与效能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 614-625.
Gong J, Sun Y J, Zheng J R, et al. Construction and efficiency analysis of Jiangsu marine seismic stations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 614-625. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)