

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230417001

## 江苏海洋地震台站建设与效能分析\*

官杰, 孙业君, 郑江蓉, 何奕成, 张扬, 张敏, 王恒知,  
瞿旻, 卢永

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

**摘要:** 利用GL-PS2一体化短周期地震计分别在江苏海上风电平台升压站及高抗站建成两个海洋地震观测台站,并在升压站同址相临架设GL-PCS60一体化宽频带地震计对比观测。结果表明:基于海上风电平台开展海洋地震观测系统设计简单,成本较低,运行稳定可靠。相比于陆地台站,海上风电平台白天与夜晚噪声水平差异较小,但受风力天气影响显著。以升压站为例,海浪干扰集中在0.15~0.3 Hz频段附近,固有频率为1.4 Hz。地震过程频谱分析获得的地震集中频段作为地震波形滤波处理依据可以提高信噪比,获得清晰震相。基于海上风电平台开展海洋地震观测在提高海洋地震监测预警能力的同时,地震过程频谱分析固有频率稳定性以及地震集中频段可为海上风电平台结构在发震过程中的影响情况做出安全评估。

**关键词:** 海洋风电平台; 背景噪声; 频谱分析; 固有频率

**中图分类号:** P315    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0614-12

## Construction and Efficiency Analysis of Jiangsu Marine Seismic Stations

GONG Jie, SUN Yejun, ZHENG Jiangrong, HE Yicheng, ZHANG Yang, ZHANG Min,  
WANG Hengzhi, QU Min, LU Yong

(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Two marine seismic observation stations have been built at the booster and high resistance stations of an offshore wind power platform using the GL-PS2 integrated short-period seismometer. The GL-PCS60 integrated broadband seismometer has also been deployed at the same site as the booster station to enable comparative observations. The results show that the offshore marine observation system, based on the offshore wind power platform, is simple, cost-effective, stable and reliable. When compared with the terrestrial stations, the noise level differences of the offshore wind power platform are smaller in the daytime and at night, but they are significantly affected by wind weather conditions. Taking the booster station as an example, the wave interference is concentrated in the 0.15-0.3 Hz band and the natural frequency is 1.4 Hz. The signal-to-noise ratio can be enhanced and a clear phase can be obtained by using earthquake concentration frequency derived from the spectrum analysis of the seismic process as the basis of seismic waveform filtering. The evolution of marine seis-

\* 收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-05-29

基金项目:江苏省地震烈度速报与预警工程项目(2023)、江苏省地震局青年科学基金项目(202206)、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:官杰(1989—),男,工程师。主要从事地震仪器研发与运维。E-mail:498602259@qq.com

通讯作者:孙业君(1979—),男,高级工程师。主要从事地震监测预报预警相关研究。E-mail:syj\_4116@126.com

mic observation, based on offshore wind power platforms, can improve the monitoring and early warning capability for marine earthquakes. The natural frequency stability and earthquake concentration frequency derived from the spectrum analysis of the seismic process can also provide a safe assessment of the influence of offshore wind power platform structures during the earthquake generation process.

**Keywords:** offshore wind power platform; background noise; spectrum analysis; natural frequency

## 0 引言

党的二十大报告提出“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”,同时指出“强化海洋安全保障体系建设,完善国家风险监测预警体系”。中国地震局《国家地震科技发展规划(2021—2035年)》中明确提出优先开展海域地震构造探测和调查,建立固定和流动相结合的海域地震观测网,建立地震海啸监测预警系统,开展海域工程构筑物的地震安全性研究等。

我国海洋地震观测自“十一五”计划以来逐步发展,2006年上海市地震局在东海利用活节柱平台与石油平台建立首个海洋地震观测系统,其中活节柱平台后期因电源故障而失效<sup>[1]</sup>。2007年天津市地震局在渤海同样利用海上石油平台建设海底井下地震台站,后因设备故障未获得理想观测数据<sup>[2]</sup>。2009年东海海底观测小衢山试验站建成并获得长期连续观测资料<sup>[3]</sup>。2012年中国科学院声学研究所牵头承担的南海和东海海底观测网试验系统,实现了观测网关键核心技术的自主可控,攻克了海底观测网总体技术,并制定了我国首个海底观测网技术规范<sup>[4]</sup>。2018年中国科学院地质与地球物理研究所所在福建湄屿岛开展海底地震观测研究,突破了线缆式海底地震观测台(网)关键技术,实现数据实时传输功能,具备进入地震行业网的能力<sup>[5]</sup>。

目前为止,海洋地震观测无论是钻井式、线缆式、浮标式等都面临诸多问题,包括观测系统设计复杂,例如线缆式观测系统包括光电传输系统、海床基、岸基管理系统与支撑系统;施工难度大,例如海底井下观测需要针对护管安装、设备组装、钻孔和设备下井、电缆布设等多个关节进行重点监控,海底钻井施工需要专业的工程地质调查船负责海底深井的钻探以确保钻井深度、垂直度要求<sup>[6]</sup>;通讯条件差,石油平台钻井式以及浮标式观测大多采用卫星通信,信号传输极不稳定,即便采用线缆式海洋观测方式,仍存在每日断计现象,甚至出现一

天内仅记录几分钟数据的现象<sup>[7]</sup>;建设成本高,海底观测专业设备价格昂贵,观测系统的复杂性导致辅助观测设备过多,例如不间断电源UPS,卫星通讯系统以及具有强抗摩擦、抗腐蚀性的长光电缆线等等,此外还包括高昂的海上作业施工成本,例如前期海底勘探、海上钻井、设备安装等,设备下井稳固后即无法取出,为一次性投入,线缆式海洋地震观测还需配套的岸基建设。

江苏东临黄海,海域地质环境较为复杂,且存在深大断裂发育,由北至南分布有北部拗陷、中部隆起、南部拗陷、勿南沙隆起区,发育有北西向的苏北—滨海大断裂,响水口—千里岩断裂等大型断裂,其中苏北—滨海大断裂全长达270公里,占江苏海岸线的近1/3,是一条至今仍在活动的大断裂<sup>[8]</sup>。江苏海域地震活动频繁,强度较大,自有记载以来,共发生6级以上地震16次,包括1846年南部拗陷7.0级地震。自1970年以来,共发生4.7级以上地震14次(不包含余震和震群次大地震),其中1984年5月21日6.2级地震和1996年11月9日6.1级地震,均引起江浙沪地区较大的社会恐慌<sup>[9]</sup>。2021年11月17日,大丰海域发生5.0级地震,东部沿海地区普遍震感强烈,引起社会广泛关注<sup>[10]</sup>。

为推动海洋地震监测创新发展,强化海洋地震监测预警能力,江苏省地震局充分利用社会资源优势,联合三峡集团江苏分公司积极开展基于海上风电平台的海洋地震监测研究,并在大丰海域风电升压站以及高抗站平台建成HYS01和HYS02两个海洋地震观测台,如图1、2所示。升压站以及高抗站平台外形结构相似,尺寸大小有所差异,其中升压站长42.8 m,宽37.6 m,共四层,距海岸45 km;高抗站长31.5 m,宽20 m,共四层,距海岸51 km。基于海上风电平台方式为今后海洋地震观测发展提出新的思路。基于海上风电平台的海洋地震监测网络区别于海底地震观测,其建设目标:(1)系统设计简单;(2)观测系统稳定;(3)实时传输满足入网要求;(4)数据质量满足海洋地震监测预警要求。

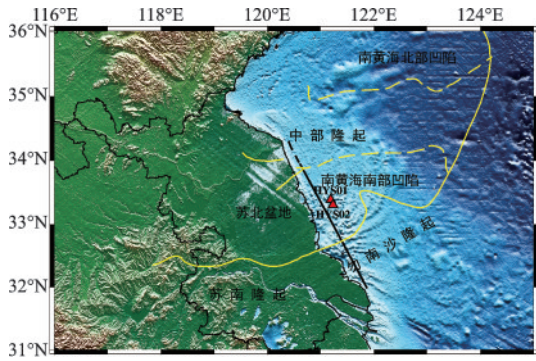


图1 海洋地震观测站分布

Fig.1 Distribution of marine seismic observation stations



图2 海上风电平台升压站

Fig.2 Booster station of an offshore wind power platform

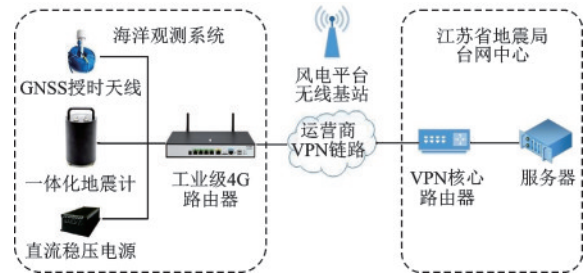


图3 基于海上风电平台的地震台观测系统拓扑图

Fig.3 Topology diagram of the seismic observation system based on an offshore wind power platform

器,负责数据汇集、存档及后续处理。

不同于线缆式海底观测需要建立时间服务器NTP授时,一体化地震计直接采用GNSS授时天线授时,架设便捷且授时更为精准稳定。海上风电平台本身作为发电系统,电力供给方面具有得天独厚的优势,风电平台220 V交流电经过直流稳压电源转为12 V直流电持续为一体化地震计以及工业级4G路由器供电。此外,海上风电平台通过海底光缆与陆地岸边集控中心进行网络传输,为海洋地震观测系统数据传输提供网络保障。基于海上风电系统的海洋地震观测系统设计较为简单,且建设成本远低于传统的海底观测。

## 1 观测系统设计

基于海上风电平台的海洋地震观测台站由海洋观测系统、网络传输系统与台网中心组成,如图3所示,海洋观测系统包括一体化地震计、GNSS授时天线、直流稳压电源以及工业级4G路由器。网络传输系统基于海洋风电平台已有的无线基站,工业级4G路由器内置物联网卡,基于公网通过VPN拨号直连江苏省地震局行业内网。台网中心在江苏省地震局核心机房,包括VPN核心路由器以及服务

## 2 效能分析

在大丰海域的海上风电平台升压站以及高抗站分别布设HYS01和HYS02两个海洋地震观测台,均采用北京港震公司生产的GL-PS2一体化短周期地震计,其中HYS01还同址相临架设同为北京港震公司生产的GL-PCS60一体化宽频带地震计对比观测,台站代号HYB01,仪器参数见表1。设备全部安装于风电平台主体立柱旁,并采用北京远航信通公司生产的RH-S700防护罩密封防护。

表1 观测仪器参数

Table 1 Parameters of the observation instruments

序号	设备	频带宽度	阻尼	灵敏度	数据采集器	转换因子	采样率/Hz
1	GL-PCS60	60 s-50 Hz	0.7	1 000 V/m/s	EDAS-24GN	74.5 nV/count	100
2	GL-PS2	2 s-50 Hz	0.7	1 000 V/m/s	EDAS-24GN	74.5 nV/count	100

### 2.1 网络延迟与连续率

通过统计试运行阶段省地震局台网中心数据汇集情况,判断基于海上风电平台的海洋地震观测

系统是否能够长期稳定运行,也作为正式入网观测的主要依据。数据统计时段为2022年12月22日至2023年1月5日,包括网络延迟以及连续率,见表2。

表2 网络延迟与连续率统计

**Table 2 Statistics on network delay and continuity**

日期	HYB01		HYS01		HYS02	
	延迟/	连续率/	延迟/	连续率/	延迟/	连续率/
	s	%	s	%	s	%
2022-12-22	0.51	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-23	0.50	100	0.55	100	0.59	99.99
2022-12-24	0.50	100	0.56	100	0.59	100
2022-12-25	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-26	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-27	0.51	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-28	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-29	0.49	100	0.55	100	0.59	99.99
2022-12-30	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2022-12-31	0.50	100	0.56	100	0.59	100
2023-01-01	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2023-01-02	0.51	100	0.55	100	0.59	100
2023-01-02	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2023-01-03	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2023-01-04	0.50	100	0.55	100	0.59	100
2023-01-05	0.50	100	0.55	100	0.59	100

因省地震局服务器 Jopens 6.1 系统采用快流数据汇集方式,3套设备网络延迟较低且差距不大, HYB01 平均网络延迟为 0.5 s, HYS01 为 0.55 s, 最大的 HYS02 也仅为 0.59 s, 此外 3 套设备的连续率几乎均为 100%。由此可见,基于海上风电平台自身无线基站 4G 信号以及工业级 4G 路由器 VPN 拨号实现数据传输不仅搭建便捷,而且具有低延迟、高稳定性特点,满足海洋地震监测预警要求。

2.2 背景噪声水平分析

背景噪声水平是地震观测环境质量的重要指标<sup>[11]</sup>,相比于传统利用石油开采平台搭建海洋地震观测台站,海上风电平台的升压站及高抗站平日处于无人值守状态,不存在较大的生产活动干扰。海上风浪是基于海上风电平台的海洋地震观测环境噪声水平重要影响因素,大丰及附近海域 2023 年 1 月 1 日至 16 日风力历史记录见表 3。以弱风天气无震时段 2023 年 1 月 1 日为例,选择夜晚 00~02 时段以及白天 12~14 时段对 3 套设备进行 1~20 Hz 背景噪声均方根 RMS 计算以及功率谱密度 PSD 对比分析(表 4)。

表3 大丰地区风力记录

**Table 3 Record of wind force in Dafeng district**

日期	01-01	01-02	01-03	01-04	01-05	01-06	01-07	01-08
风力风向	东北风 2 级	东北风 3 级	北风 1 级	东南风 2 级	东南风 2 级	西风 3 级	东南风 1 级	西南风 3 级
日期	01-09	01-10	01-11	01-12	01-13	01-14	01-15	01-16
风力风向	东北风 4 级	东北风 3 级	东南风 3 级	东南风 3 级	东北风 3 级	北风 5 级	西北风 4 级	西北风 3 级

表4 3套设备 RMS 值

**Table 4 RMS values of 3 sets of equipment**

时间	HYB01			HYS01			HYS02		
	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS
00	1.56e-06	8.46e-06	1.36e-05	3.13e-06	1.69e-05	2.71e-05	2.10e-06	1.77e-05	2.18e-05
01	1.44e-06	7.87e-06	1.19e-05	2.88e-06	1.57e-05	2.37e-05	2.61e-06	1.80e-05	2.37e-05
02	1.37e-06	5.95e-06	1.00e-05	2.73e-06	1.19e-05	2.01e-05	1.16e-06	8.13e-06	8.99e-06
12	1.23e-06	2.60e-06	3.67e-06	2.45e-06	5.20e-06	7.35e-06	1.06e-06	1.81e-06	2.05e-06
13	8.50e-07	3.82e-06	6.14e-06	1.7e-06	7.64e-06	1.23e-05	1.23e-06	9.58e-06	9.15e-06
14	9.41e-07	5.37e-06	7.16e-06	1.88e-06	1.07e-05	1.43e-05	2.47e-06	2.30e-05	2.68e-05

HYB01 垂直向平均背景噪声水平 1.23e-06 m/s, 东西向 5.68e-06 m/s, 南北向 8.74e-06 m/s; HYS01 垂直向平均背景噪声水平为 2.46e-06 m/s, 东西向 1.13e-05 m/s, 南北向 1.74e-05 m/s; HYS02 垂直向平均背景噪声水平为 1.77e-06 m/s, 东西向 1.3e-05 m/s, 南北向 1.54e-05 m/s。3 套设备垂直向均可达到 V 级环境噪声水平。按照《地

震台站观测环境技术要求》<sup>[12]</sup>第一部分测震(GB/T 19531.1-2004)内容要求,海岛、港湾、距海边小于 10 km 范围内沿海 E 类测震台站短周期地震计台基噪声满足应不大于-110 dB(3.16e-06 m/s),由此 HYS01 以及 HYS02 满足测震台站架设要求。值得注意的是 HYB01 作为宽频带地震计若按照 E 类地区其台基噪声略低于技术要求 -120 dB(1.00e-06

m/s), 但因其地处海洋远离海岸且与E类地区台基要求差距不大, 我们不做过多要求。同时段同分量3套设备之间噪声水平差距较小, 且均表现为垂直向噪声水平优于水平向, 东西向略优于南北向, 海浪干扰造成水平向较高的噪声水平。相比于陆地地震观测台站, 基于海上风电平台的海洋地震观测台具有较高的背景噪声水平, 但同时段三分量之间差距较小, 且同分量白天与夜晚的噪声水平差距较小, 陆地地震观测环境受人类活动影响严重<sup>[13]</sup>, 而海洋地震观测则相对较少。此外, 在海上风电平台升压站同址相临对比观测的HYB01噪声水平略低于HYS01, 虽差距不大但推测这与1~20 Hz频段内一体化短周期地震计GL-PS2相比于一体化宽频带地震计GL-PCS60较高的仪器自噪声水平有关。

图4功率谱密度分析显示3套设备白天与夜晚背景噪声功率谱曲线几乎一致, 海上风电平台升压站同址相临观测的HYB01与HYS01功率谱曲线也基本一致, 1~20 Hz频带范围内HYB01功率谱曲线略低于HYS01, 这与1~20 Hz背景噪声均方根计算结果一致。HYB01在整个观测频段尤其是长周期频段没有显现出GL-PCS60较低仪器自噪声而具备的低噪声水平优势, 相近的功率谱曲线说明基于海上风电平台升压站开展地震观测所记录观测数据中主要来自共同的环境噪声。HYB01与HYS01功率谱曲线在高噪声模型(NHNM)附近, 0.04 Hz以下频段垂直向低于水平向, 东西向低于南北向; 在0.04~0.1 Hz频段内, 三分量几乎一致, 0.1~2 Hz频段内东西向与南北向基本一致, 高于垂直向约10 dB; 2 Hz以上频段三分量几乎一致。此外, 1.4 Hz附近三分量存在明显尖峰, 不受时段影响。HYS02在0.3 Hz频段以下功率谱曲线明显低于HYS01, 总体表现为0.04 Hz以下频段功率谱曲线夜间三分量相对离散, 而白天较为一致, 总体保持较低噪声水平; 0.04~0.1 Hz频段内, 三分量几乎一致; 0.1~2 Hz频段内东西向与南北向基本一致, 高于垂直向约5 dB; 2 Hz以上频段三分量几乎一致。1~2 Hz频段内存在明显双尖峰, 1.1 Hz最为明显, 同样不受时段影响。基于海上风电平台高抗站的海洋地震观测台站HYS02在0.3 Hz以上高频段与升压站HYS01背景噪声水平差距较小, 而0.3 Hz以下低频段相对较低, 表明在中远地震监测方面HYS02具有一定的优势, 而近震观测差距不大, 宜选择宽频带地震观测设备。

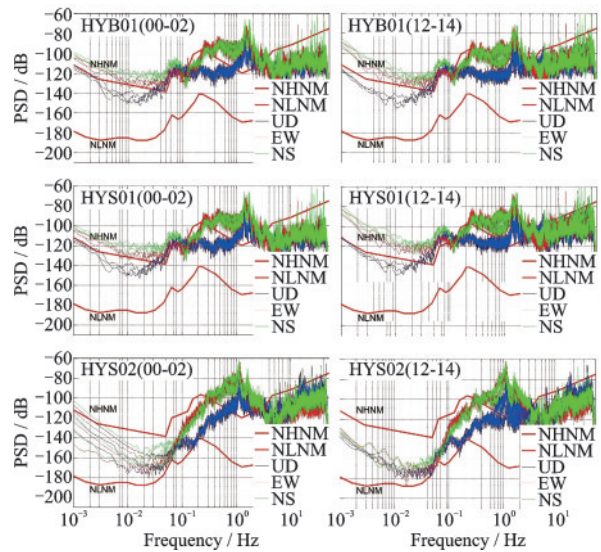


图4 3套设备白天与夜晚的功率谱密度曲线

Fig.4 Power spectral density curves of 3 sets of equipment during day and night

为深入探讨风浪对于基于海上风电平台的海洋地震观测的影响情况, 选择1月1日、3日、7日弱风力观测数据以及9日、14日、15日强风力观测数据进行PSD对比分析。由图5可知, HYS01和HYS02在强风力天气作用下全频段功率谱曲线上, 0.1~3 Hz频段上升幅度最为明显, 例如9日HYS01的功率谱曲线相比于1日上升近20 dB。HYS01在弱风力天气功率谱曲线基本在高噪声模型NHNM曲线附近, 强风力天气普遍高于NHNM曲线。HYS02低频段噪声在弱风力天气低频段三分量相对一致, 在强风力作用下出现离散性, 呈现为水平向高于垂直向, 南北向高于东西向。此外, HYS01在1.4 Hz以及HYS02在1.1 Hz同样出现的尖峰, 不受天气影响。

### 2.3 频谱分析

以海上风电平台升压站为例, 开展不同风力强度天气条件下的地震观测频谱分析, 选择2023年1月1日弱风天气无震时段以及1月9日强风天气无震时段, 图6显示海上风电平台升压站水平向在0.3 Hz、1.4 Hz附近出现明显尖峰, 此外南北向在1.7 Hz附近尖峰明显, 强风作用下水平向0.3 Hz附近尖峰出现多峰现象。垂直向0.15 Hz附近出现明显尖峰, 并在强风作用下向高频方向频移。推测垂直向0.15 Hz尖峰及水平向0.3 Hz尖峰与风力作用

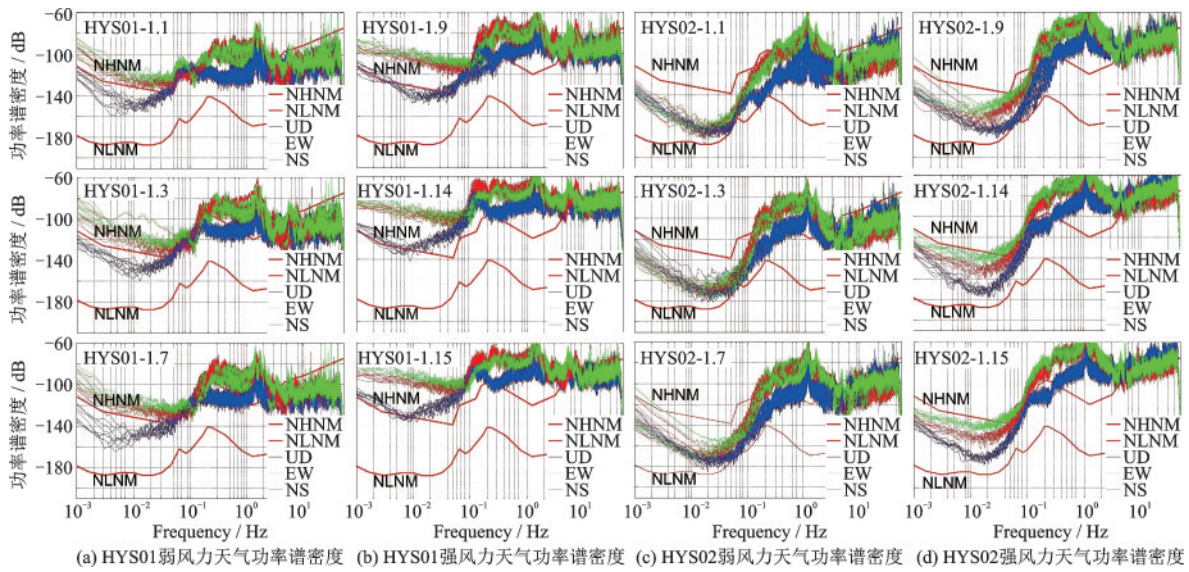


图5 强弱风力天气功率谱密度曲线

Fig.5 Power spectral density curves of weather conditions with strong and weak winds

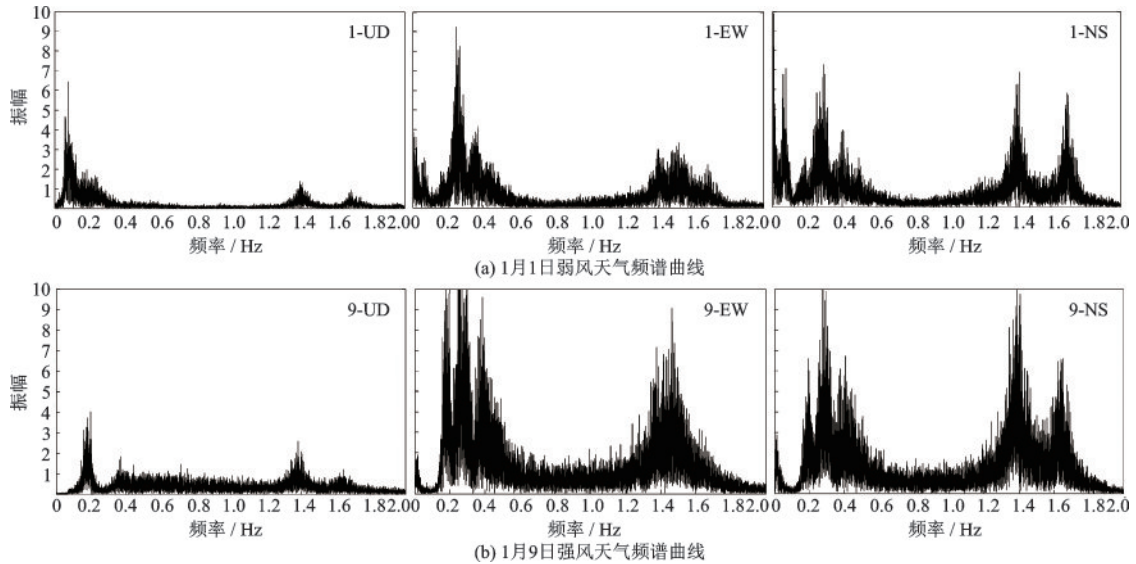


图6 强弱风力天气升压站频谱曲线

Fig.6 Spectrum curves of the booster station under strong and weak wind weather conditions

下海浪有关,这与杭州湾海浪1.6~5.4 s年变化范围,2.9 s平均周期结果相近<sup>[14]</sup>。此外垂直向0.15 Hz尖峰与水平向0.3 Hz尖峰也说明水平向与垂直向在海浪作用下的响应有所差异。进一步结合图4和图5功率谱分析结果,1.4 Hz尖峰不受强弱风力天气以及时段影响,判断1.4 Hz为海上风电平台升压站结构一阶固有频率,推测1.7 Hz为海上风电平台升压站二阶固有频率。

基于海上风电平台的海洋地震台站升压站HYS01前期勘选时由GL-PS2一体化短周期地震计成功记录到2022年11月14日南黄海海域M3.8

近震,并在HYB01台正式运行后由GL-PCS60一体化宽频带地震计成功记录到2023年2月6日土耳其两次M7.8远震。针对以上三次地震事件进行频谱分析,图7南黄海海域M3.8近震振幅谱显示震前阶段三分量仅在0.3 Hz海浪频段附近以及1.4 Hz固有频率频段存在明显尖峰;震时阶段三分量在3 Hz附近出现尖峰,其中垂直向最为明显;震后阶段3 Hz附近尖峰消失,由此推测HYS01台记录南黄海海域M3.8近震观测频段集中在3 Hz附近。此外,这次地震过程中1.4 Hz固有频率未发生明显变化。图8和图9土耳其两次M7.8级远震振幅谱同

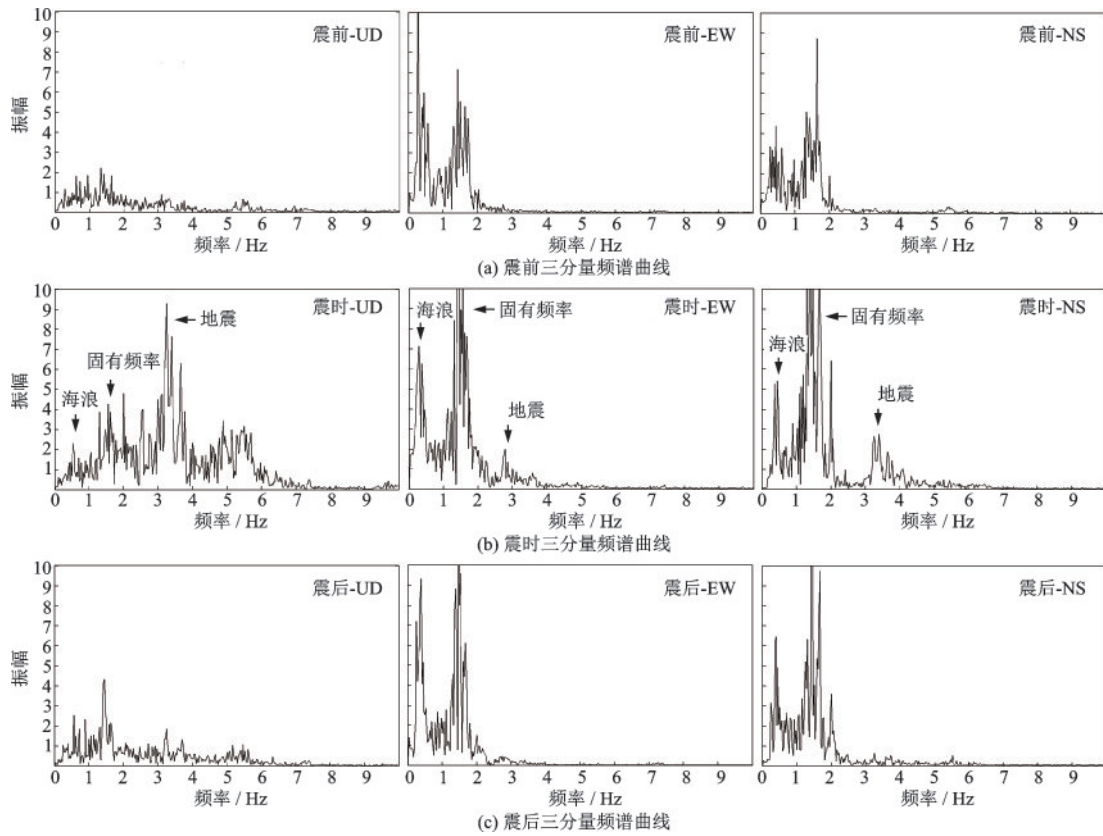


图7 南黄海海域M3.8地震频谱曲线

Fig.7 Spectrum curves of the M3.8 earthquake in the South Yellow Sea

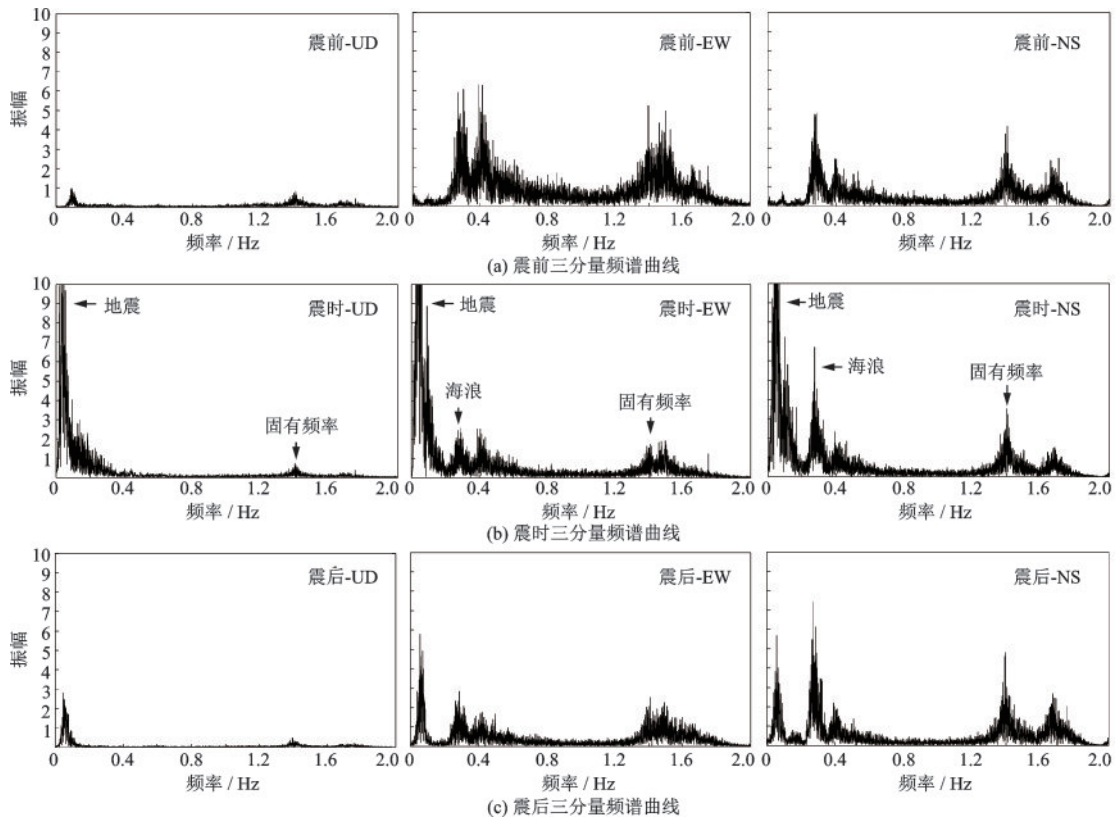


图8 土耳其上午9时M7.8级地震频谱曲线

Fig.8 Spectrum curves of the M7.8 earthquake in Turkey at 9:00 am

样显示震前阶段三分量0.3 Hz附近海洋尖峰以及1.4 Hz固有频率尖峰,震时阶段在0.1 Hz以下出现较大尖峰,并且在震后阶段逐步消失,由此推测HYB01台记录土耳其两次7.8级远震观测频段集中于0.1 Hz以下。0.1 Hz以下频段超出HYS01和HYS02一体化短周期地震计观测频段,因此未被记

录。与南黄海海域M3.8近震相似,整个发生过程1.4 Hz固有频率尖峰没有明显变化。三次地震过程中固有频率良好的稳定性表明地震事件没有引起海上风电平台升压站明显的结构强度及材料特性变化,这可能与地震记录集中频段与1.4 Hz固有频率存在差距有关。

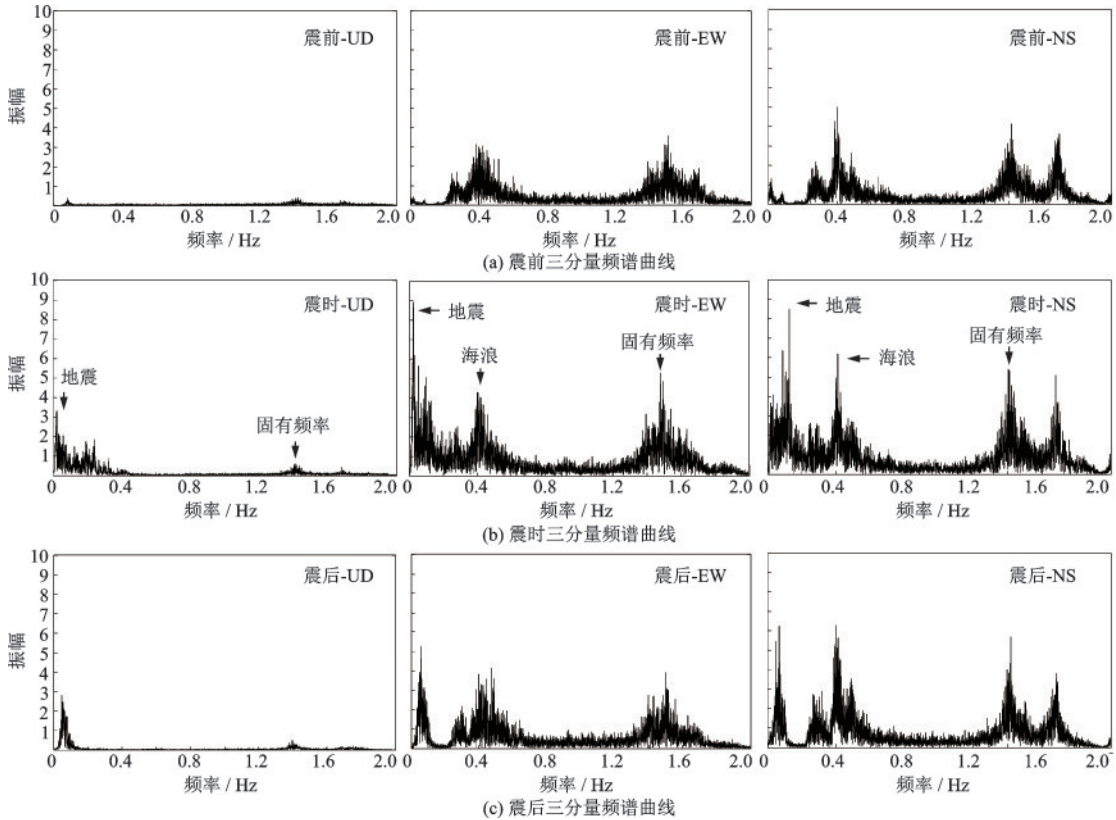


图9 土耳其下午6时M7.8级地震频谱曲线

Fig.9 Spectrum curves of the M7.8 earthquake in Turkey at 6:00 pm

经过频谱分析得到上述三次地震观测数据中地震成分所集中的频段,为地震原始波形分析滤波处理截止频率的选择提供参考依据。南黄海海域M3.8近震所记录地震频段在3 Hz附近,选择2 Hz高波滤波;两次土耳其M7.8远震集中在0.1 Hz以下,选择0.1 Hz低通滤波,各地震原始及滤波后波形如图10~12所示。三次地震原始波形经滤波处理后信噪比大幅提高,震相清晰可识别。

此外基于大丰海域海上风电平台升压站的HYB01以及HYS01成功记录到2023年3月22日大丰海域M2.2级近震,由图13可以看出对于二者而言,较高信噪比的近震波形使得HYB01和HYS01记录地震波形差异性不大,震相比较为清晰。

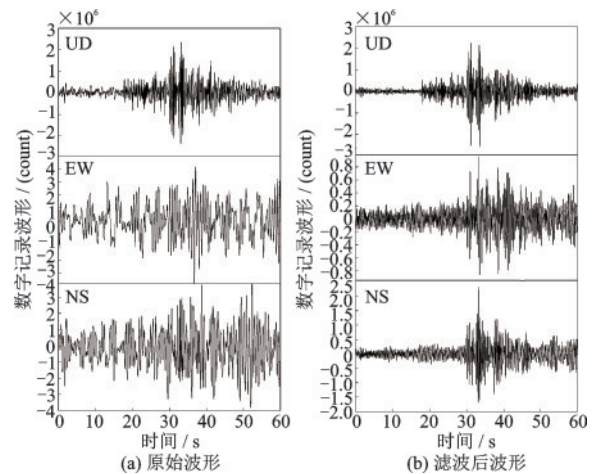


图10 南黄海海域M3.8地震滤波前后波形

Fig.10 Waveforms before and after filtering of M3.8 earthquake in the south yellow sea

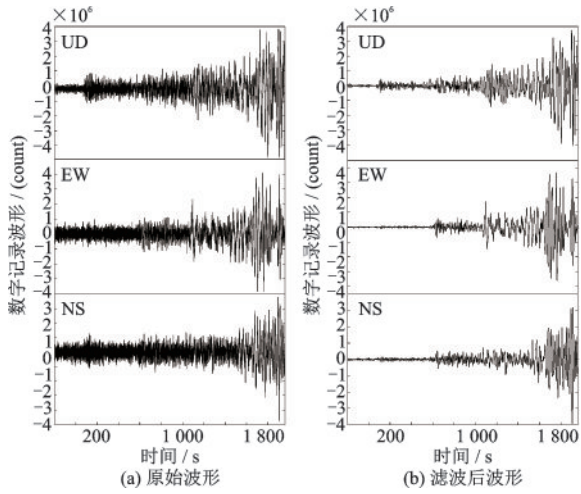


图 11 土耳其上午 9 时 M7.8 级地震滤波前后波形

Fig.11 Waveforms before and after filtering of the M7.8 earthquake in Turkey at 9:00 am

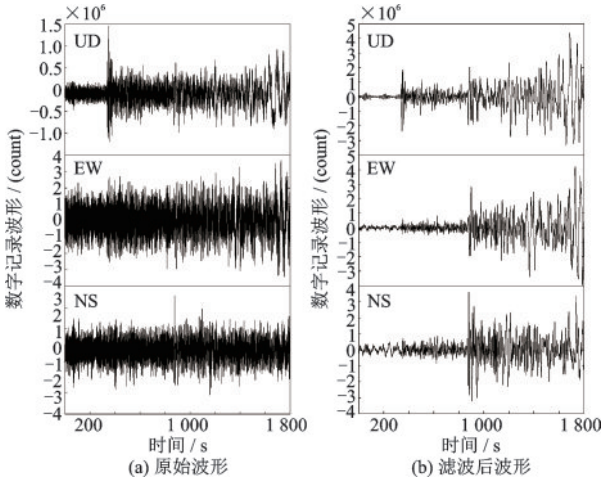


图 12 土耳其下午 6 时 M7.8 级地震滤波前后波形

Fig.12 Waveforms before and after filtering of the M7.8 earthquake in Turkey at 6:00 pm

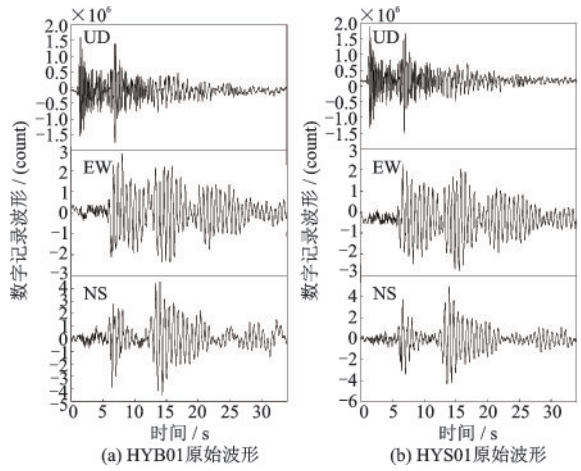


图 13 大丰海域 M2.2 地震波形

Fig.13 Waveforms of the M2.2 earthquake in the Dafeng sea

同时二者水平向均出现较大振幅的干扰,值得深入研究。

为深入研究此次大丰海域 M2.2 级近震对于海上风电平台升压站的结构影响以及水平向较大干扰的原因,对 HYB01、HYS01 记录此次近震波形进行频谱分析,如图 14~15 所示。研究发现相比于短周期地震计 HYS01,采用宽频带地震计观测的 HYB01 能够清晰记录到海浪的干扰,由于海浪频段主要集中在 0.3 Hz 频段略低于 HYS01 的 GL-PS2 一体化短周期地震计观测频段,因此 HYS01 记录海浪干扰较弱,尤其垂直向。除此之外,HYB01、HYS01 记录大丰海域 M2.2 级近震频谱曲线大致相近。二者频谱曲线显示震前阶段三分量在 0.3 Hz 海浪频段(HYS01 垂直向除外)以及 1.4 Hz 固有频率频段存在明显尖峰;震时阶段三分量在 1~5.5 Hz 频段得到加强,尤其在 1.4 Hz 附近频率(最大尖峰)、3.3 Hz 附近频率以及 5.5 Hz 附近频率,垂直向最为明显;震后阶段三分量在 1~5.5 Hz 频段降低至震前水平。本次地震过程 1.4 Hz 固有频率未发生明显变化,表明地震事件没有引起海上风电平台升压站明显的结构损伤;本次地震频段主要集中在 1~5.5 Hz 频段;地震频段覆盖海上风电平台升压站固有频率引起共振现象,导致震时阶段水平向较大振幅的干扰。

### 3 结 论

基于海上风电平台开展海洋地震观测,利用 GL-PS2 一体化短周期地震计分别在海上风电平台升压站和高抗站建成 HYS01 和 HYS02 两个地震观测台站,并在 HYS01 同址相临架设 GL-PCS60 一体化宽频带地震计,台站代码 HYB01。经过一段时间的观测得出以下结论:

(1) 基于海上风电平台的海洋地震观测具备系统设计简单、成本低、运行稳定可靠等特点,3 套设备网络延迟维持在 0.5 s 左右,连续率接近 100%,满足入网及海洋地震监测预警要求。

(2) 背景噪声分析显示基于海上风电平台的海洋地震观测基本在 V 类环境噪声水平,海浪作用下水平向噪声水平高于垂直向,南北向高于东西向。海上风电平台升压站地震观测记录主要来自环境

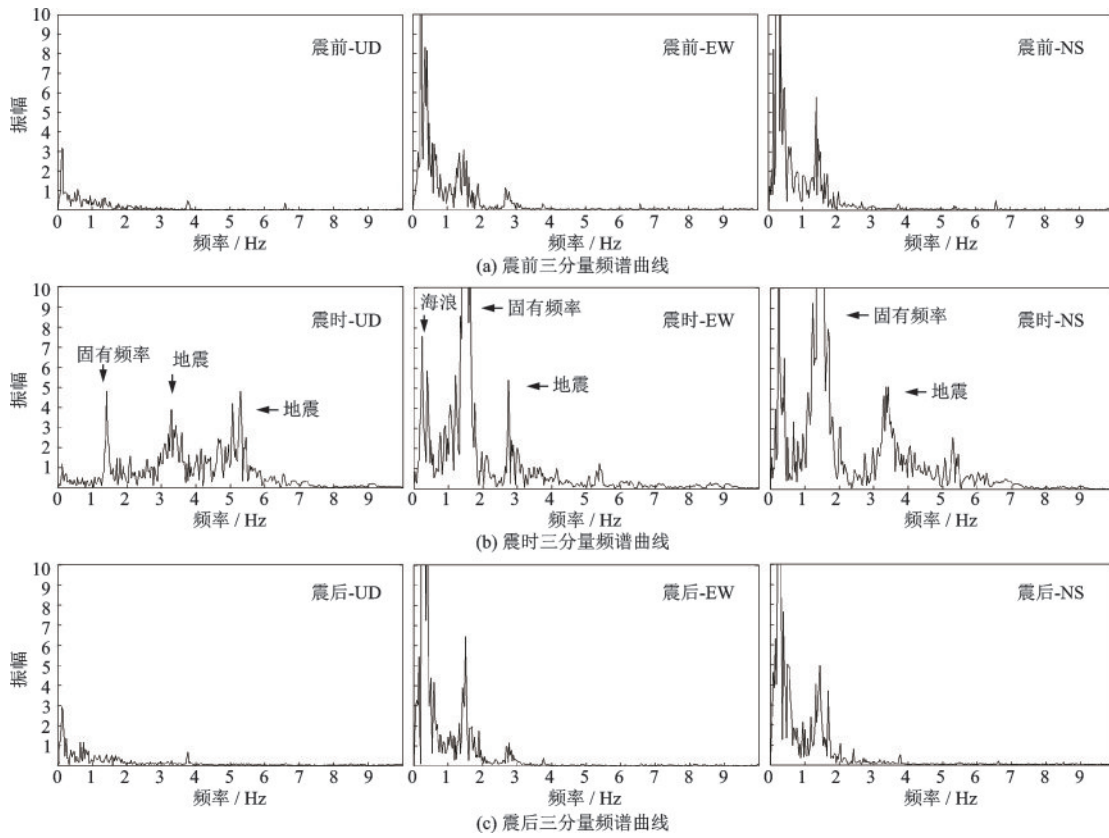


图 14 HYB01 记录大丰海域 M2.2 级地震频谱曲线

Fig.14 Spectrum curves of the M2.2 earthquake in the Dafeng sea recorded by HYB01

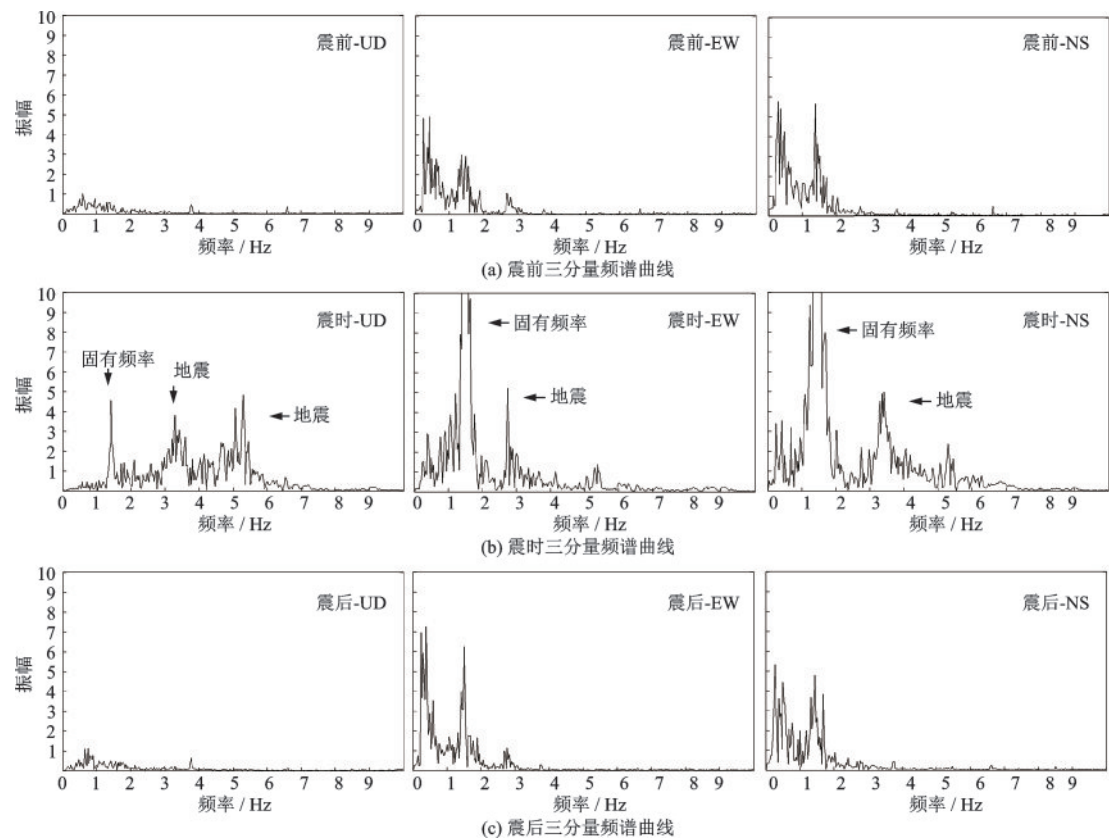


图 15 HYS01 记录大丰海域 M2.2 级地震频谱曲线

Fig.15 Spectrum curves of the M2.2 earthquake in the Dafeng sea recorded by HYS01

噪声, HYB01 与 HYS01 功率谱曲线较为一致。相比于陆地台站白天与夜晚噪声水平差距较小, 但受风力天气影响明显, 在强风力作用下全频段功率谱曲线上升, 0.1~3 Hz 频段最为明显。功率谱曲线中海上风电平台升压站和高抗站分别在 1.4 Hz 和 1.1 Hz 出现尖峰, 不受天气和时段影响。

(3) 以升压站为例, 频谱分析显示海浪干扰集中在 0.3 Hz 频段, 结合功率谱分析结果推测 1.4 Hz 为海洋风电平台升压站的结构固有频率。地震过程频谱分析表明, 南黄海 M3.8 级近震中地震频段集中在 3 Hz 附近, 两次土耳其 M7.8 远震集中在 0.1 Hz 以下频段, 0.1 Hz 以下频段超出 GL-PS2 一体化短周期地震计观测范围, 因此仅 HYB01 成功记录此次地震。根据地震频段对地震原始波形进行相应滤波处理, 可以提高地震观测信噪比, 得到更为清晰的震相。此外, 地震过程频谱分析中固有频率所表现的良好稳定性说明升压站并未受到地震事件引起的明显结构损伤, 由此推测基于海上风电平台开展海洋地震观测不仅能够提高海洋地震监测预警能力, 同时可以以地震观测过程中的地震集中频段以及固有频率稳定性为参考, 实时为海上风电平台结构在发震过程中的影响情况做出安全评估。

(4) 大丰海域 M2.2 级地震频段覆盖海上风电平台升压站的结构固有频率, 引起共振现象导致震时水平向出现较大振幅, 震后的快速消失以及 1.4 Hz 固有频率的稳定性说明本次地震未引起升压站明显的结构损伤。

## 参考文献:

- [1] 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, 139(3):32-37, 42.  
Lian W P, Fang G Q, Yang D K, et al. Discussion on the latest progress of international and domestic marine seismic observation [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2009, 139(3):32-37, 42. (in Chinese)
- [2] 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.  
Yang C, Xie Q C, Ma Q, et al. A review of study on seafloor seismic observation network [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(2):161-167. (in Chinese)
- [3] 张艳伟, 范代读, 许惠平. 东海海底观测网小衢山试验站记录的 2010 年智利海啸信号分析[J]. 科学通报, 2011, 56(32):2732-2740.  
Zhang Y W, Fan D D, Xu H P. Records of the tsunami induced by the 2010 Chilean earthquake from Xiaoshan seafloor observatory in the East China Sea [J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(32):2732-2740. (in Chinese)
- [4] 李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 海底观测网技术进展与发展趋[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3):33-35.  
Li F H, Guo Y G, Wu L X, et al. Technological progress and development trend of ocean bottom observatory network [J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3):33-35. (in Chinese)
- [5] 郝天珧, 郭永刚, 张艺峰, 等. 线缆式海底地震观测技术——以浯屿岛海底地震观测台为例[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11):4323-4338.  
Hao T Y, Guo Y G, Zhang Y F, et al. Cabled seafloor observation technology: a case study of the submarine seismic in Wuyu Island [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(11):4323-4338. (in Chinese)
- [6] 贺同江, 刘红艳, 孙路强. 海底地震观测技术探索与实践[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(增1):72-75.  
He T J, Liu H Y, Sun L Q. Integrated exploration and practice of undersea earthquake observation technology [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(Sup1):72-75. (in Chinese)
- [7] 贾正大, 李军, 金星, 等. 海底地震仪自噪声分析[J]. 中国地震, 2022, 38(3):486-493.  
Jia Z D, Li J, Jin X, et al. Self-noise analysis of seismometer ocean bottom [J]. Earthquake Research in China, 2022, 38(3):486-493. (in Chinese)
- [8] 刘建达, 李清河, 张元生, 等. 江苏中、南部及邻区地震重新定位及在断层研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(11):58-66.  
Liu J D, Li Q H, Zhang Y S, et al. Hypocenter relocation in central and southern Jiangsu province and adjacent areas, China and its application to fault research [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(11):58-66. (in Chinese)
- [9] 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 Pre-

- vention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6):1351-1353. (in Chinese)
- [10] 何奕成, 缪发军, 赵启光, 等. 2021年11月17日江苏大丰海域江苏大丰海域M5.0地震震源区三维P波速度结构[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1):167-175. He Y C, Miao F J, Zhao Q G, et al. The three-dimensional P wave velocity structure across the source region of 17 november 2021 Dafeng Sea Area M5.2 earthquake, Jiangsu revealed by seismic tomography [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1):167-175. (in Chinese)
- [11] 宫杰, 居海华, 胡米东, 等. 溧阳地震台地面与井下地震观测对比分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(4):913-919. Gong J, Ju H H, Hu M D, et al. Comparative analysis of ground and underground seismic observation at Liyang seismic station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4):913-919. (in Chinese)
- [12] 地震台站观测环境技术要求第1部分:测震:GB/T 19531.1—2004[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会, 2004.
- [13] 宫杰, 居海华, 鲍海英, 等. 地震流动观测防护罩集成优化与效果分析[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(4):855-867. Gong J, Ju H H, Bao H Y, et al. Integration optimization and effect analysis of earthquake flow observation shield[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2020, 15(4):855-867. (in Chinese)
- [14] 杨斌, 叶钦, 张俊彪, 等. 杭州湾中部波浪统计分布[J]. 水道港口, 2018, 39(1):38-43. Yang B, Ye Q, Zhang J B, et al. Statistical wave distribution of central Hangzhou Bay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(1):38-43. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)