

基于 Φ -OTDR的海风机与海底电缆在线状态 监测方法*

陈 勇¹, 张 驰², 丁哲文², 冯 磊¹, 贾星杰¹, 赵世松³, 王 健²,
张益昕^{2**}

(1. 中广核(北京)新能源科技有限公司, 北京 100822; 2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210033;
3. 南京法艾博光电科技有限公司, 南京 211135)

摘 要: 利用自研的 Φ -OTDR系统, 在福建省某海上风电场开展了演示验证, 实现了对海风机机组的启动-运行-停机等不同工况下的状态分析与诊断, 总结了不同工况下的振动特征及诊断依据; 以及针对海底电缆的水流冲击、锚害拖拽、抵近船只航行等监测预警功能, 总结了不同海缆状态下及周边环境感知目标事件特征。实测结果证明该方案能够在线监测海风机与海底电缆状态, 并有效感知周围环境, 为提升海上风电场运维水平提供了可靠的技术途径。

关键词: 相位敏感光时域反射; 海底电缆; 海风机; 锚害; 水流冲击; 工况分析

中图分类号: TN919.12; TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0053-09

Online Monitoring of Offshore Wind Turbines and Submarine Cables Based on Φ -OTDR

CHEN Yong, ZHANG Chi, DING Zhewen, FENG Lei, JIA Xingjie, ZHAO Shisong,
WANG Jian, ZHANG Yixin

(1. CGN (Beijing) New Energy Technology Co., Ltd, Beijing 100822, CHN; 2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210033, CHN; 3. Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing 211135, CHN)

Abstract: The self-developed Φ -OTDR system was used to demonstrate and verify in an offshore wind farm in Fujian Province. The state analysis and diagnosis of Marine blower unit under different working conditions such as start-up, operation and shutdown were realized, and the vibration characteristics and diagnosis basis under different working conditions were summarized. In addition, according to the monitoring and warning functions of submarine cable, such as current impact, anchor damage towing, sailing of approaching ships, etc., the characteristics of target event perception under

收稿日期: 2022-12-13

* **基金项目:** 国家自然科学基金项目(U2001601, 62175100, 61975076); 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2019GG374); 中央高校基本科研业务费(0213-14380202)

作者简介: 陈 勇(1979—), 男, 工程师, 研究方向为新能源场站综合平台搭建;

张 驰(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式光纤海缆监测;

丁哲文(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式光纤输电线路监测;

张益昕(1984—), 男, 副教授, 研究方向为微弱信号检测、高速数据采集、数字信号处理等。(E-mail: zyx@fib-tech.com)

** 通讯作者

different state of submarine cable and surrounding environment were summarized. The measured results showed that the scheme could monitor the status of sea blower and submarine cable online, and effectively perceive the surrounding environment, which could provide a reliable technical way to improve the operation and maintenance level of offshore wind farms.

Key words: phase sensitive optical time-domain reflectometer(Φ -OTDR); submarine cable; offshore wind turbine; anchor damage; water flow impact; working condition analysis

引 言

随着我国 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标的明确提出,风电在全国电力供应中的占比不断提升。我国拥有着丰富且优质的海上风力资源,总海岸线长度超过 3.2 万公里,可利用海域面积超过 300 万平方公里。其中,水深 5~50 米的海域其水上 70 米高度的空中具备 5 亿千瓦的风电开发潜力^[1]。近年来,在一系列产业政策支持下^[2],中国海上风电行业快速发展,装机容量持续增长。截止 2021 年,海上风电累计装机 2639 万千瓦,新增装机 1690 万千瓦,使得中国海上风电总装机容量达到全球的 45%,成为世界上最大的海上风电生产国。

然而,受海洋恶劣运行环境的影响,海上风电机组各部件尤其是塔筒和叶片故障率相较于陆上设备有明显的增高。风电系统中承担电力回输功能的海底电缆会受到海水长期侵蚀、冲刷、微生物腐蚀等自然因素影响而老化、损坏。同时,随着我国海洋开发活动的不断增加,海底电缆的运行被捕捞作业、货船抛锚等破坏的情况也经常发生^[3]。近年来,国内外多起海风机及海底电缆事故引发严重社会问题,严重影响了海上风电场的安全稳定运行^[4]。如福建平潭海底电缆锚害导致的全岛停电^[5],舟山浣屿岛海底电缆磨损导致的缆体损坏,台湾海域发生地震造成的电缆体断裂,丹麦 Anholt 电场海风机三个叶片的转子从风电机组分离脱落等。海上风电系统一旦发生故障,其维护作业往往依赖于特种船舶与装备^[6],且作业时间经常受制于天气条件,维护成本高昂。因此,对风电系统进行健康监测,提前预警可能发生的故障,降低运维成本、提高运维能力,已成为海上风电发展面临的重大课题。

2019 年,张雄雄等人^[7]提出一种植入式柔性复合蒙皮形状光纤传感方法。将光纤光栅传感器植入硅胶薄层,与聚氯乙烯薄片组成复合蒙皮。建立柔性蒙皮形状传感系统,通过测得不同翼型下柔性

蒙皮中光纤光栅反射谱特征及其变化规律,计算出了柔性蒙皮弯曲曲率,并重建出柔性蒙皮变形三维形状。2020 年,赵春溢等人^[8]通过给风机叶片施加的激励来模拟叶片运行过程中产生的振动,利用马赫-泽德尔干涉光纤传感系统对振动信号进行监测,得到了叶片振动的振幅和频率信息,并根据此评估叶片损伤情况。2020 年,徐志钮等人将单谐波法引入布里渊光时域反射计(BOTDR)用于海缆的温度、应变测量,大大减少了测量时间^[9]。然而,上述方法通常适用于静态或准静态物理量如应变、温度、压力,不适用于对振动类动态信号的测量,从而难以实现海风机工况的在线分析及海缆扰动事件的准确判别。

相位敏感光时域反射计(Phase-sensitive optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR)具有响应快(毫秒乃至亚毫秒量级)、抗电磁干扰和灵敏度高(纳应变)的优点,是在线监测海风机状态及海底电缆动态扰动事件的理想技术。2018 年,南安普顿大学 Masoudi A 等人为评估海底电缆机械应力监测的可行性^[10],研制了一种便携式分布式振动传感器,能够监测到 10 km 海底电缆上频率低至 0.1 Hz 的动态扰动事件,空间分辨率为 1 m。这项研究表明,在安装阶段监测海底电缆状况时,可以使用 Φ -OTDR 传感技术来防止电缆过度弯曲和过度张力。2019 年,Williams^[11]等人利用 Φ -OTDR 监测比利时周边的海底光缆,观测到了万里之外发生的斐济地震在 0.01~0.1 Hz 频段的地震波相位,并观察到了相对的海表面重力波组如何产生双频地震波,取得了珍贵的研究成果。同年,加利福尼亚大学的 Lindsey^[12]等人基于既有海缆,利用 Φ -OTDR 在蒙特雷海湾实现了地震预警监测。2021 年,南京大学张旭莘^[13]等人提出了一种基于 Φ -OTDR 的增强型海缆损耗与扰动同步监测系统,该系统是第一个能够兼容水下线缆级联中继的测振系统,实现了单跨监测距离 121 km、多跨 1 000 km 的海缆损耗与振动同步监测。

文中利用外差相干探测 Φ -OTDR系统,结合光纤布线方法对风机塔筒和叶片进行工况监测试验,并对海底电缆进行在线状态监测及周围环境感知监测实验,为未来以 Φ -OTDR为代表的海风机及海底电缆在线监测系统提供技术手段。

1 Φ -OTDR 测量原理

光纤纤芯的折射率存在均匀的起伏,这些起伏的位置可以被认为是光纤中一个个离散的“散射点”。 Φ -OTDR向传感光纤发送探测光脉冲,光脉冲沿光纤传输时遇到散射点生成随机的瑞利散射光信号,其中满足全反射并与探测光传输方向相反的瑞利散射光被称为瑞利背向散射信号(RBS)^[14]。在外部声场的作用下,光纤的长度、折射率、芯径会随之发生变化,从而影响该位置RBS相位,如图1所示。选择外部声场扰动区前后的两部分光纤作为参考区R1和R2。则这两个参考区域产生的RBS电场表示为:

$$\begin{cases} E_{R1} = E_1 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ E_{R2} = E_2 \cos[\omega t + \varphi_0 + \frac{4\pi n}{\lambda}(L + \Delta L)] \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_1 和 E_2 为两个区域内的RBS信号电场强度, ω 是入射光的角频率, φ_0 是初始相位, λ 为入射光的波长, L 是两参考区域内之间的光程差, ΔL 是声场引起的光程变化, n 为光纤芯的折射率。两个参考区域的相位差可以表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L \quad (2)$$

由式(2)可知, ΔL 与两参考区域的相位差 $\Delta\varphi$ 呈线性关系。而式(1)、(2)的光信号需要转换成电信号才能进行解调。在进行外差相干探测时,由于载波的频率 ω 远超过平衡光电探测器(Balanced Photodetector, BPD)的响应带宽,因而式(1)会变成中频信号形式:

$$I_{\text{out}}(t) \propto E_A E_B \sin(\Delta\omega t + \varphi(t) - \varphi_0) \quad (3)$$

其中, $\Delta\omega$ 是声光调制器(Acousto-optic Modulator, AOM)引入的频移, E_A 是与光纤位置相关的RBS信号光场强; E_B 是本振光的场强表示; $\varphi(t)$ 是散射点的相位。此中频信号是载波加载的调相信号。因此,对载波上的相位变化进行解调可以获得 $\Delta\varphi$,从而定量地对声场进行测量^[15]。

光纤纤芯的折射率存在均匀的起伏,这些起伏

的位置可以被认为是光纤中一个个离散的“散射点”。 Φ -OTDR向传感光纤发送探测光脉冲,光脉冲沿光纤传输时遇到散射点生成随机的瑞利散射光信号,其中满足全反射并与探测光传输方向相反的瑞利散射光被称为RBS信号。RBS信号在叠加过程中发生干涉,接收端接收到RBS信号曲线强度表现出随机起伏,这种与光纤中随机分布的散射点相关的随机起伏被称为相干衰落效应^[13-15]。 Φ -OTDR利用RBS信号之间的相干衰落效应进行传感检测,当某段光纤受到外界振动事件的作用时,对应区域光纤发生形变,其折射率和长度也随之发生改变,进而导致该段光纤内散射点产生的RBS信号的幅度和相位也发生变化,通过分析振动事件作用前后的RBS信号曲线即可实现对外界振动事件进行传感测量。

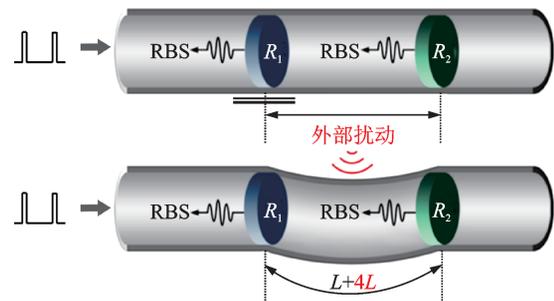


图1 外部声场对光纤影响示意图

Fig.1 Influence of external sound field on optical fiber

Φ -OTDR由于是对背向散射光的测量,解调主机放置在机房即可对待测线路实现单端测量,并不需要形成光纤回路,同时由于 Φ -OTDR解调出的相位与声场强度呈线性关系从而准确解调出作用于待测线路的振动信息。因此, Φ -OTDR是十分适合海风机及海底电缆在线监测的技术手段。Ada-5000系列高性能 Φ -OTDR是自行研发的传感系统,外场试验表明,该系统可以动态调整参数,主要参数包括:80 km测量距离,30 kHz脉冲重复频率,2 m空间分辨率。

2 基于 Φ -OTDR的海风机监测

2.1 风机中的传感光缆及解调主机布置

为了保证结构强度,风机叶片内部有两道玻璃钢为叶片的上下蒙皮提供支撑,所以叶片内部一般有三个舱室,其中支撑板与蒙皮构成的两个舱室的空间较大,更适合进行光缆布设操作。为了能够

得到更高的等效空间分辨率,将光缆以“S”型进行布设。通过这种排布方式,在每米叶片上布设了约 5 m 的传感光缆,可以将 φ -OTDR 的等效空间分辨精度提高到原来的五倍。叶片中传感光缆的具体布设轨迹如图 2(a)所示。两个舱室的传感光缆布设完成后分别如图 2(b)和(c)所示。由于叶片是贴合而成,每个构件都有可能出现结构损伤,因此在 8 m 长的叶片的两个舱室的蒙皮和支撑板共四个面上都布设了传感光缆。因为叶片是旋转结构,无法将光缆引出到叶片外部的机舱中,故而需要将解调主机安装在叶片内部。当解调主机随着叶片转动时,其与叶片的连接位置将持续承受极大的应力。为了保证风力发电机运行时,解调主机足够稳固。根据风力发电机生产厂家的建议,在叶片内表面上,利用玻璃钢手糊工艺安装了钢架结构来固定解调主机,如图 2(d)所示。

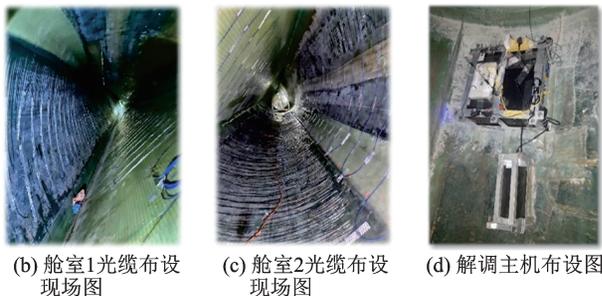
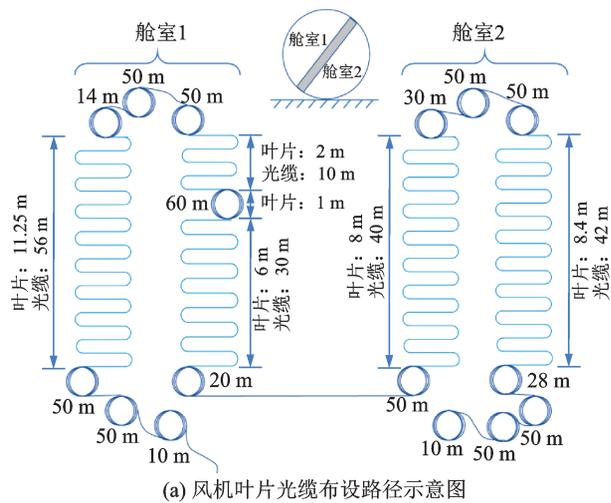
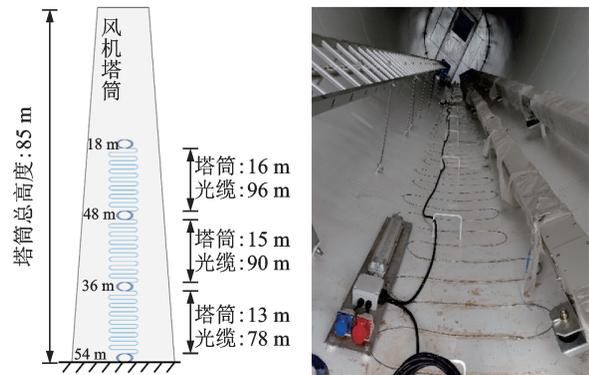


图 2 风机叶片内光缆布置图

Fig.2 Layout of optical cable in wind turbine blade

塔筒要支撑顶部机舱和叶片的重量,并且要能够承受强风带来的应力,因此塔筒通常是钢材质的筒形结构。为了得到更高的等效空间分辨率,同样以 S 型在每米高的塔筒上布设 5 m 长的传感光缆。塔筒中传感光缆的具体布设轨迹如图 3(a)所示。在

塔筒不同节之间平台上预留数十米的光缆环,从而更容易区分不同节上的光缆振动。不同于叶片,塔筒在风机工作过程中无旋转,因此解调主机可以放置于塔筒第一层的防水、防尘 4U 机柜中,如图 3(c)所示。



(c) 解调主机图

图 3 风机塔筒光缆布置图

Fig.3 Optical cable layout in wind turbine tower

2.2 风机启动-停机-运行时状态分析

Φ -OTDR 记录的风机启动过程中每节塔筒的振动随时间的变化情况如图 4(a)所示,横轴表示光缆的皮长,纵轴为时间,不同光缆皮长对应的塔筒位置在图片最上面标出。随着风机的启动,170 s 处塔筒由安静状态迅速进入振动状态。图 4(b)显示出低频部分振动频率在同一节的塔筒中分布较为一致。而振动在沿着塔筒壁传播时,会受到平台及连接件的影响,因此振动频率在不同节的塔筒上的分布呈现差异,但主要集中于 0.3 Hz ~ 0.4 Hz。图 4(c)给出了图 4(a)中选定位置的时域图,更为直观地反映了风机从启动到变桨调速过程中振动状态的变化。短时傅里叶变换可观察到风机启动后振动频率沿特定轨迹缓慢爬升至多个特定位置,如图 4(d)所示,其中红色虚线标示了其中一条爬升轨迹。

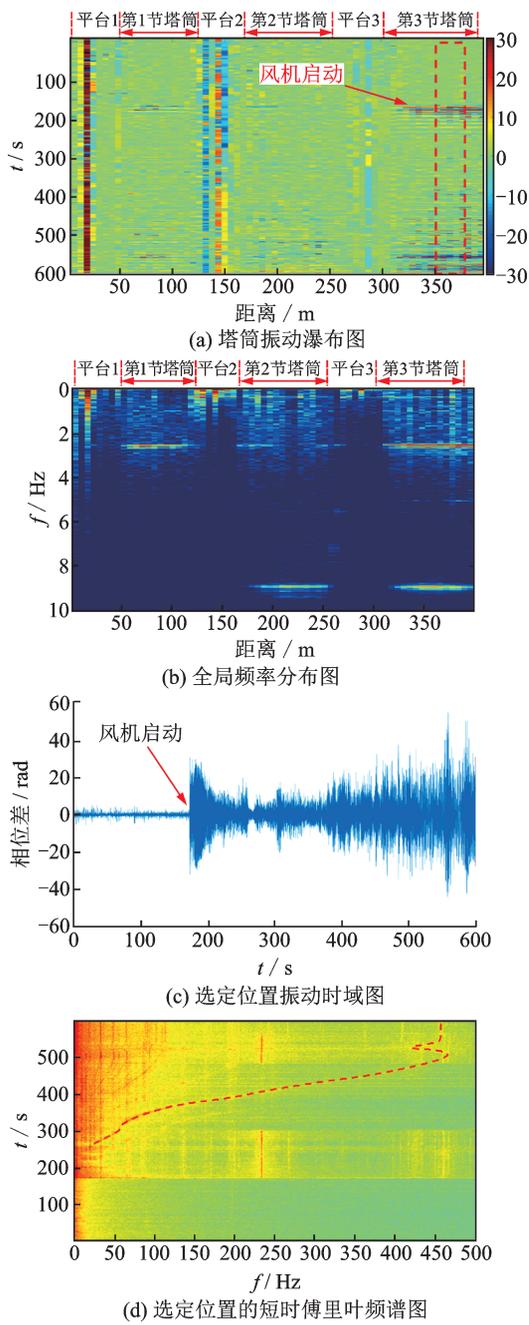


图4 风机启动监测图

Fig.4 Monitoring diagram of wind turbine startup process

Φ-OTDR记录的风机停机过程中每节塔筒的振动随时间的变化情况如图5(a)所示,随着风机停机,塔筒的振动强度也随之逐渐降低,其中第二节塔筒的振动强度在停机时明显弱于第一节和第三节塔筒。图5(b)给出了振动在低频时的分布情况,塔筒振动能量在低频段仍然主要集中于0.3 Hz~0.4 Hz,但是发生了展宽。同时观察到第二节塔筒处的特征峰能量明显弱于另外两节塔筒,且第一节塔筒和第三节塔筒在0.1 Hz附近出现了一个宽约0.15 Hz的特征峰。图5(c)给出了图5(a)中选定位

置的时域图,观察到一个明显的制动动作。完全制动后,塔筒振动强度呈现明显的单调衰减。短时傅里叶变换结果如图5(d)所示,风机停机过程中,多个位置的振动频率沿特定轨迹缓慢降低,在制动时刻,高频振动分量几乎完全消失,低频分量逐步收束。图中红色虚线标示了其中一条频率变化轨迹。

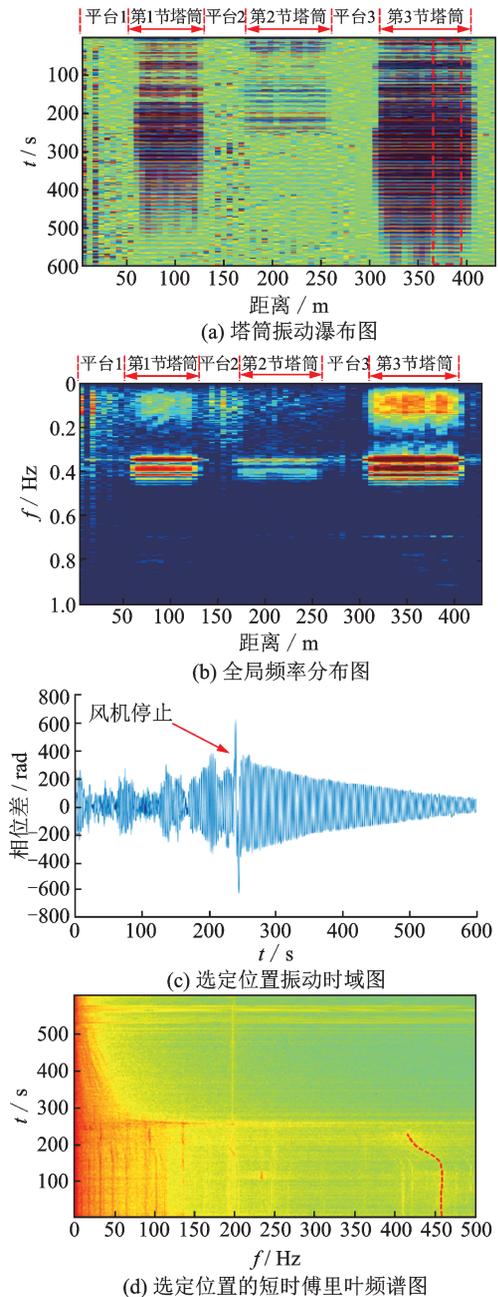


图5 风机停机监测图

Fig.5 Monitoring diagram of wind turbine stop process

分析了风机的启/停状态后,选取了叶片某固定位置总时长为7 h的连续振动来分析风机在工作状态下的振动特点,其振动时域图如图6(a)所示,风机持续工作了约5.7 h后,进入停机状态,且此后再未启动。对振动信号做短时傅里叶变换后得到

图 6(b), 风机在工作时, 有数个主要的振动频率, 疑似为某低成分倍频且分布很稳定。进一步地, 图 6(c) 展示了振动信号快速傅里叶谱低频部分, 观察到有若干组尖锐的振动特征峰, 其中 0.3~0.4 Hz 的特征峰发生了明显的展宽。此外, 除了 0.14 Hz 的特征峰外, 其余 6 个特征峰均为 0.43 Hz 的倍频。图 6(d) 将 7 个特征峰的强度随时间变化与风速进行对比, 特征峰的强度并没有随着风速逐渐下降而呈现变化, 在风速低于 2.6 m/s 时风机制动前特征峰都较为稳定, 说明当风速在一定区间内风机振动在低频部分特征稳定。

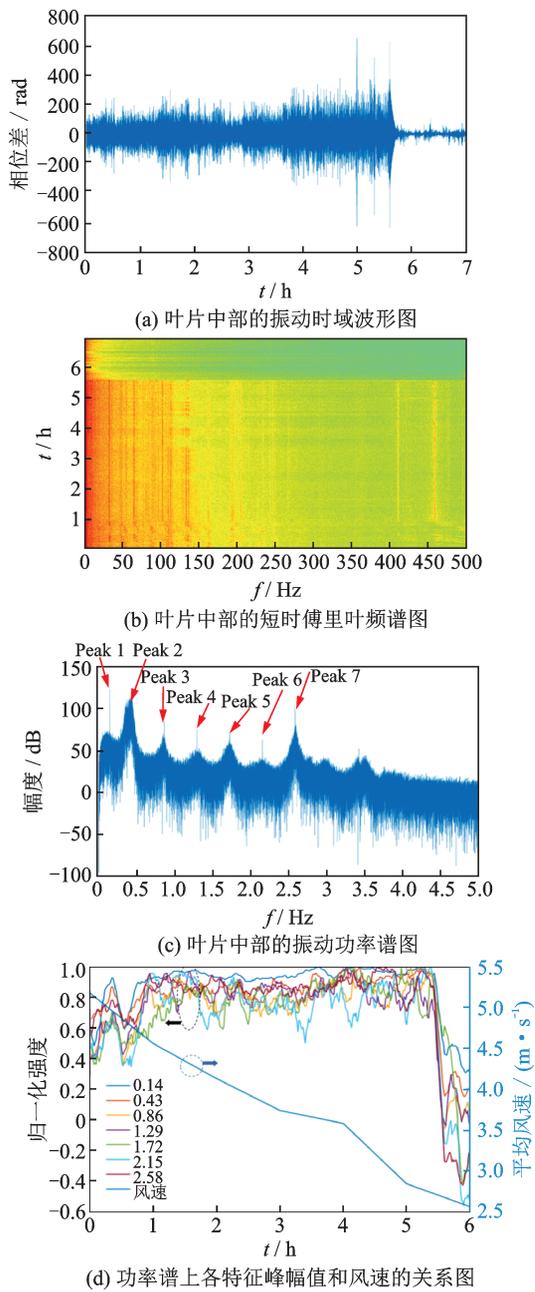


图 6 风机工作过程监测图

表 1 风机在不同工况时, 塔筒/叶片振动提供的状态分析依据

Tab.1 In different working conditions, the vibration of the tower barrel/blade provides the basis for state analysis

风机 工况	塔筒		叶片	
	振动特征	判断依据	振动特征	判断依据
启动	谐振频率簇的位置改变	短时傅里叶频谱图	/	/
运行	/	/	单音谐振及倍频(0.43 Hz)	叶轮转速、风速
停机	存在自阻尼振动	阻尼比	/	/

3 基于 Φ -OTDR 的海缆监测

为了验证 Φ -OTDR 系统在现场条件下实时在线监测既有海缆状态以及对周围环境感知的能力, 在福建某风电场海洋的自然水体中进行了水流冲击和锚害拖拽实验, 以及对航行船只进行了船只抵近监测^[16]。

3.1 Φ -OTDR 系统部署及实验背景

整个系统的部署如图 7 所示, 将 Φ -OTDR 主机安装在岸上的机房内, 接入升压站和海风机、升压站和岸端机房之间的 XLPE HVAC 型海底电缆中的冗余光纤。海缆主体位于水深约 20 米的海域内,

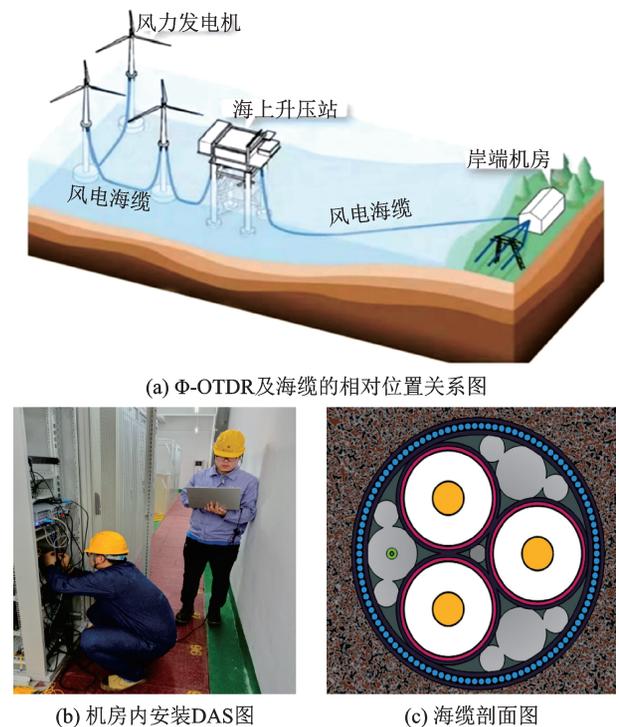
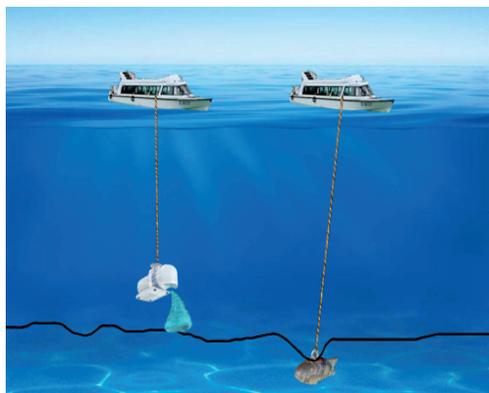


图 7 Φ -OTDR 系统部署图

Fig.7 Deployment diagrams of Φ -OTDR system

埋深为 2.5~3 m。图 7(c)中黄色为电缆三相,白色为 XLPE 层,红色为屏蔽层,蓝色为铠装,使用的光纤位于绿色位置,相比于输电部分更靠近缆表,更容易感受到外界的振动,这使得 Φ -OTDR 系统能在威胁缆芯安全的事件发生前提供预警。

如图 8(a)所示,分别将水泵及铅鱼绑在实验船的绳索上,让水泵悬挂于海缆上方 1 m 处工作以验证海缆对水流冲击的感知,将铅鱼在海床上拖行来模拟轻微的锚害拖拽。图 8(b)则展示了海缆上方的航道所经过的船只,将监测结果与摄像头监控录像进行比对以验证海缆对船只的感知能力。



(a) 水流冲击及锚害拖拽示意图



(b) 监测船只

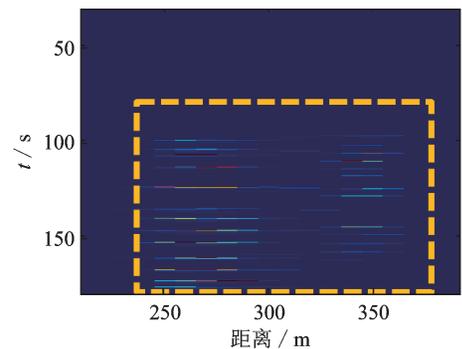
图 8 海洋实验现场

Fig.8 Marine experiment sites

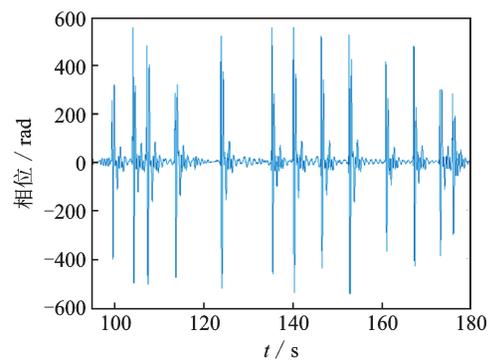
3.2 实验结果分析

实验过程中,将实验船只停留在距离光缆起点约 300 m 处缆上方,然后将模拟水流冲击用的水泵下沉到约 19 m 深并通过绳索固定在船上,启动水泵喷水。喷水过程中,驾驶实验船只在垂直于缆的方向来回行驶,结果如图 9 所示。图 9(a)为重构信号的时空功率分布瀑布图,颜色映射对应了信号的功率。观察到,当水流冲击产生的振动传播到光缆

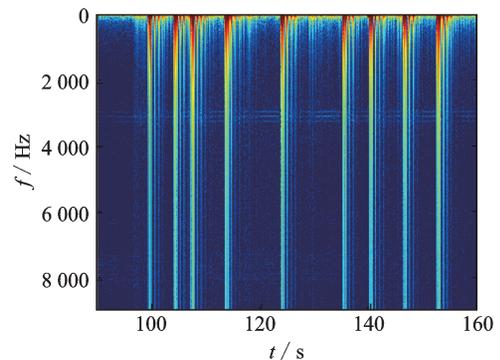
时,瀑布图呈现出明显的亮条纹,如图中黄色矩形框中所示,振动中心位置为 295 m,覆盖范围约 ± 45 m,中心位置前后考虑到缆的布设方式上不完全一致,因此对振动的响应也不完全一致。以中心位置信号绘制成时频域图分析。图 9(b)展示了该时间段内缆受到 13 次连续的冲击,从图 9(c)中观察到,每次冲击信号其实是个宽频信号,随后迅速缩小为若干低频特征,这是典型的冲击信号的频域响应。验证了 Φ -OTDR 系统对海缆受到随机扰动事件的高还原性。



(a) 光缆受扰动瀑布图



(b) 扰动位置的时域图



(c) 扰动位置短时傅里叶图

图 9 水流冲击光缆结果

Fig.9 Results of water impacting cable

驾驶实验船只在距离光缆起点约 240 m 处将重达 100 kg 的铅鱼抛入水中,沉至海底,沿垂直于缆的方向进行拖拽以模拟铅锚挂缆。当光缆被锚拖

拽时会产生振动,监测结果如图 10 所示。从图 10(a) 重构信号的时空功率分布瀑布图可以看到,拖拽过程发生在 340 m 附近,整个拖拽过程持续了约 1 分多钟。随着拖拽力的增大,受力光缆范围逐渐增大,最高达到了 100 m。期间有若干次拖拽再松弛的过程。对于单次拖拽,呈现从拖拽点向两侧延伸的对称“V”字线形状,这与光缆某一点被拖拽时受力区域逐渐扩大这一过程相符合。与水流冲击实验结果相比,锚拖拽的功率谱强度要大得多,并且振动开始时的宽频带能量覆盖 1s 以上,然后才逐渐衰减至低频。

图 11 (a)为连续两次大型船只经过航道时的时空功率分布瀑布图。很明显地观察到船只经过时

对缆产生的扰动。从图 11(b)单一位置的时域波形图观察到,船只经过解调出的相位由弱变强再变弱,对应着船只由远及近再远离的过程。图 11 (c) 为对应的短时傅里叶图。船只经过时的频率特征分量基本在 2 Hz~3 Hz 之间。分析该频率特征是由于船只振动声信号在水中传播,然后经由海床土壤作用于海缆引起的,而不是船只经过时造成的波浪直接作用于光缆。据调研,该航道船只通常使用二冲程低速发动机直接驱动螺旋桨。在航行过程中,其转速在 80~170 转/min 左右,并产生频率为 2 Hz~3 Hz 的噪声信号,这与实验监测到的结果一致。表 2 总结了本次实验中海缆状态监测及对周边环境感知目标事件的特征^[15]。

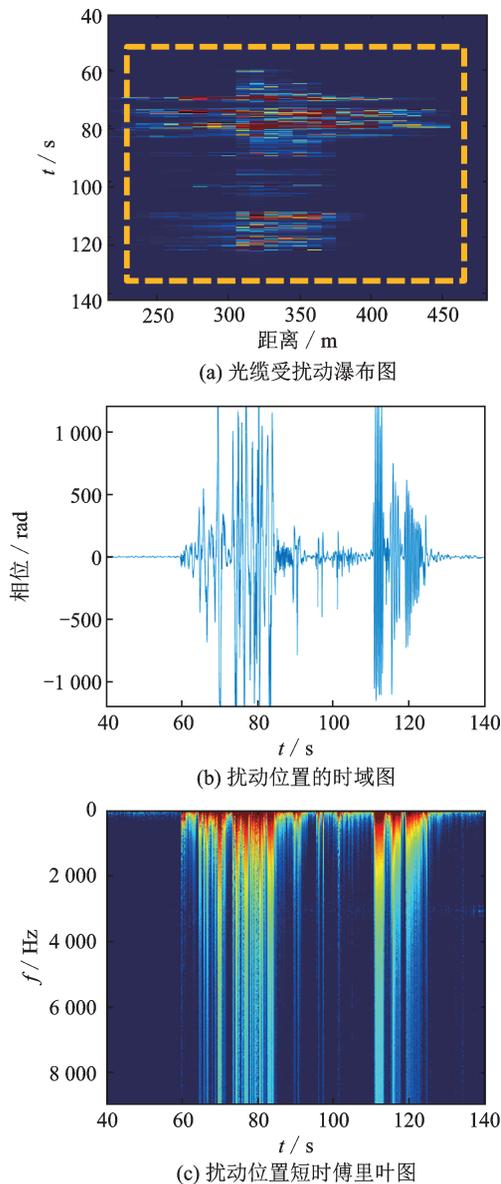


图 10 锚害模拟测试结果

Fig.10 Simulation test results of anchor damage

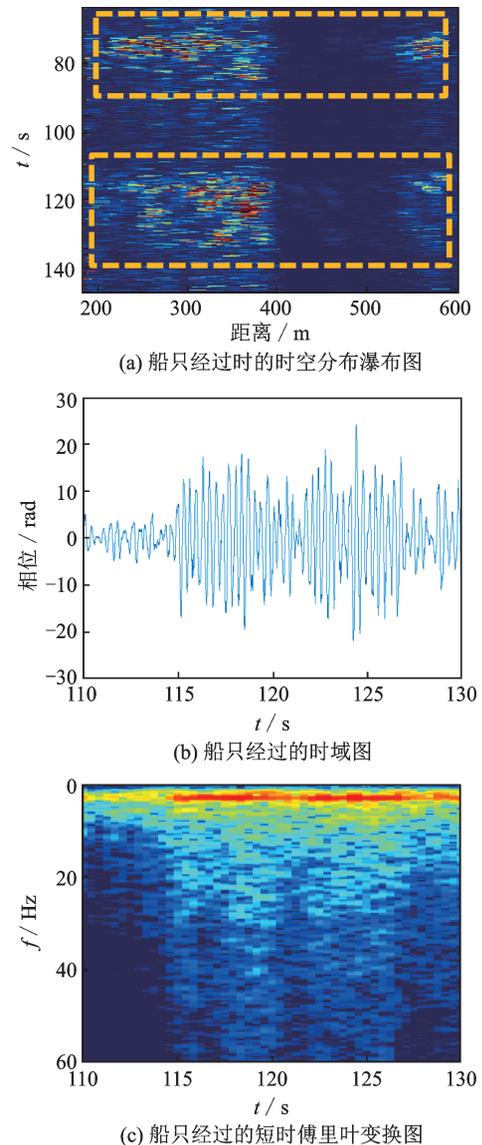


图 11 船只经过航道的 Φ -OTDR 监测结果

Fig.11 Φ -OTDR monitoring results with ships passing through the channel

表2 海缆状态监测及周边环境感知目标事件特征总结
Tab.2 Target event characteristics of cable status monitoring and surrounding environment perception

监测对象	最大动态应变/ $\mu\epsilon$	单个信号时长	频谱特征描述
水流冲击	± 2.5	数秒	起始宽频,随后频谱范围迅速缩小为若干低频特征。并且频率 ≥ 2.5 kHz的高频总能量只维持了约0.07 s,然后迅速衰减至10%以下,随后消散。
船锚挂缆	± 29	数秒	起始宽频,随后频谱范围迅速缩小为若干低频特征。并且频率 ≥ 2.5 kHz的高频总能量维持了约0.34 s后迅速衰减至10%以后又立即上升。又经过0.46 s后再次衰减至10%以下,并保持了一段时间后才消散。
船只抵近	± 0.5	数十秒	目标事件频率由占主导地位的低频及其高次谐波组成。并且主导频率随时间从2.3 Hz变化到2.7 Hz。猜测这种时变频率特性与复杂的水下流体力学有关。

4 总结

利用自研的 Φ -OTDR系统,实现了对海风机机组的启动-运行-停机等不同工况下的状态分析与诊断,对风机叶片各位置的振动、应变等参量的强度、频率、范围、持续时间等进行同步感测和联合解调,实现对在役风机叶片健康状态监测和损伤类型的准确判断。针对海底电缆的水流冲击、锚害拖拽、抵近船只航行等监测,证实了 Φ -OTDR对海底电缆状态监测及周围环境的感知能力,为未来以 Φ -OTDR为代表技术的海风机及海底电缆在线监测系统提供技术手段。

参 考 文 献

[1] 易跃春. 中国海上风电2018[J]. 电力设备管理, 2018(12):

81-83.

- [2] 黄海龙,胡志良,代万宝,等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能, 2020, 6: 3.
- [3] 吴飞龙,徐杰,郑小莉,等. 光纤传感技术在海底电缆监测中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(3): 5.
- [4] 吴飞龙,杨力帆. 光电复合技术在我国110kV海底电缆中的首次应用[J]. 中国电力, 2011, 44(2): 4.
- [5] 张若英,徐志发. 突发海缆故障折射深层次问题合理布局及大力推广[J]. 世界电信, 2009, 9: 5.
- [6] 万远琛,王凯,初岳峰. 海上风电运维的技术现状和发展综述[J]. 船舶工程, 2020, 42(12): 20-25.
- [7] 张雄雄,宋言明,孟凡勇,等. 变体飞行器柔性复合蒙皮植入式光纤形状传感[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 8.
- [8] 赵春溢,王剑涛,蒋靖,等. 基于单M-H干涉的风机叶片振动检测实验研究[J]. 电子技术(上海), 2020, 2: 2.
- [9] 徐志钮,胡宇航,赵丽娟,等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 202-209.
- [10] Masoudi A, Pilgrim J A, Newson T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 4: 37.
- [11] Williams E F, María R Fernández-Ruiz, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. Nature Communications (S2041-1723), 2019, 10(1): 5778.
- [12] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating sea-floor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [13] Chen X, Zou N, Liang L, et al. A submarine cable monitoring system based on enhanced ctdr with simultaneous loss measurement and vibration monitoring ability[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13115-13128.
- [14] 单媛媛. 基于 Φ -OTDR的分布式光纤振动传感系统关键技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [15] Ying S, Yang Y, Chen W, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. Measurement, 2016, 79: 222-227.
- [16] Chen X, Zou N, Wan Y, et al. On-line status monitoring and surrounding environment perception of an underwater cable based on the phase-locked Φ -OTDR sensing system[J]. Optics Express, 2022, 30(17): 30312-30330.