

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404079

海上风电水下资产质量缺陷及检测方法

司广全¹, 赵勇², 童博², 张宇³, 张伟利⁴, 王新², 樊伟哲²

(1.中国华能集团有限公司, 北京 100031;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3.华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司, 江苏 南京 210015;

4.华能辽宁清洁能源有限责任公司, 辽宁 沈阳 110015)

[摘要] 海上风电场水下资产的成本在海上风电项目总成本中占比不高, 但水下资产的质量对海上风电场的安全稳定运行具有重要意义。分析海上风电场内风力发电机组、海上升压站的水下钢结构和基础, 以及海底电缆在工程期和运维期出现的各类质量问题, 基于已实施的海上风电项目案例, 对相关标准的检测要求和检测方法进行评估, 针对不同质量缺陷给出了完整、有效的现场检测方案, 并在实际项目上进行应用和验证, 形成了行业内标准规范。这对海上风电场水下资产的质量管控和运行维护, 具有重要的技术指导意义和参考价值。

[关键词] 海上风电; 支撑结构; 基础; 海底电缆; 水下检测; 健康状态评估

[引用本文格式] 司广全, 赵勇, 童博, 等. 海上风电水下资产质量缺陷及检测方法[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 77-85.
SI Guangquan, ZHAO Yong, TONG Bo, et al. Quality defects of underwater assets in offshore wind power and the detecting methods[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 77-85.

Quality defects of underwater assets in offshore wind power and the detecting methods

SI Guangquan¹, ZHAO Yong², TONG Bo², ZHANG Yu³, ZHANG Weili⁴,
WANG Xin², FAN Weizhe²

(1.China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China;

2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3.Jiangsu Clean Energy Branch, Huaneng Power International Inc., Nanjing 210015, China;

4.Huaneng Liaoning Clean Energy Co., Ltd., Shenyang 110015, China)

Abstract: The cost of underwater assets in offshore wind farms is relatively low compared with the total cost of offshore wind power projects, yet the quality of these assets is vital for safe and stable operation of the offshore wind farms. The quality issues that can arise with wind turbines, underwater steel structures and foundations of offshore substations, and submarine cables during the construction and operation and maintenance phases are analyzed. Based on cases from practical offshore wind power generation projects, the inspection requirements and methods stipulated by relevant standards are evaluated, and comprehensive and effective underwater inspection methods for various types of quality defects are put forward. These methods have been verified in real cases, forming industry standards and specifications, which provides significant technical guidance and reference value for quality control and operational maintenance of underwater assets in offshore wind farms.

Key words: offshore wind power; supporting structure; foundation; submarine power cable; underwater inspection; health status assessment

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-H72); 西安热工研究院有限公司研究开发项目 (TM-23-TYK11)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H72); Research and Development Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TM-23-TYK11)

第一作者简介: 司广全 (1969), 男, 正高级经济师, 主要研究方向为电力建设质量控制技术研究, gq_si@chnng.com.cn。

通信作者简介: 童博 (1983), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电, tongbo@tpri.com.cn。

随着全球能源结构转型和气候变化问题日益严峻,海上风电作为一种清洁、可再生的能源形式,受到广泛关注。中国作为世界上最大的海上风电市场,其发展速度和规模都引领全球,累计装机连续 3 年位居全球首位,目前已占全球海上风电装机容量约 50%。我国政府在“十四五”可再生能源发展规划中提出了积极推动近海海上风电规模化发展的目标,并着力推进深远海海上风电技术的创新和示范应用。

海上风电的水下资产主要包括风力机、海上升压站的水下钢结构和基础、海底电缆^[1]。水下资产长期处于海洋复杂环境中,承受着强大的海流、风浪等自然因素以及航运、渔业等人为因素的影响,其可靠性直接关系到风电场的运行效率和安全性。水下资产缺陷问题容易导致风电场发电效率的大幅下降,甚至可能引发安全事故,造成严重的经济损失。

本文针对海上风电水下资产在基建期和运维期出现的质量缺陷问题,对相关标准中的检测要求和不同类型的检测方法进行分析评估,针对不同缺陷提出完整、有效的现场检测方案,为水下资产的质量管控和运行维护提供技术支持。

1 水下资产现场检测现状及问题

1.1 相关标准及存在问题

随着我国海上风电快速发展,近年来国家也制定了一系列和水下现场检测相关的标准,但还存在以下问题。

1) 检测标准涉及海洋工程、电力等多个行业,存在着标准选用难统一,不同标准间冲突等问题。部分在海洋石油行业中普遍使用的检测标准如果直接在海上风电应用可能要求过于严格,检测成本难以承担,如中国船级社制定的《在役导管架平台结构检验指南》。

2) 近年来新的水下检测技术和检测设备逐渐在海上风电现场检测中得到应用,但由于现有标准制定时间较早,受限于当时的技术条件还不成熟,因此部分标准未做要求或者有要求但还不全面。如国家能源局 2021 年发布的《海上风力发电建设工程质量监督检查大纲(试行)》,其中针对水下资产实体质量监督检测和监督检查的要求相对较少。

1.2 现场检测手段及存在问题

目前,水下检测的方式主要包括以下 3 种。

1) 工作船搭载测量传感器作业检测方式^[2] 该

检测方式优点是船舶速度快,开展大范围扫测的效率较高,但无法执行近距离精细化检查和测量,在水深较深或者海缆埋深较深的情况下,检测准确度会受到严重影响。

2) 潜水员使用各类手持仪器进行近距离检查和测量^[3] 该检测方式优点是复杂作业的灵活性强,但检查结论受潜水员主观影响大,对作业海况要求高、安全风险大,长时间连续作业效率低。按潜水员作业有关规定,在水深超 24 m 时,单次水下作业时长不得超过 30 min。潜水员受体力、氧气的量制约,作业范围有限,特别是当海缆发生较大位移时,很难在短时间内完成作业。

3) 水下缆控机器人(remotely operated vehicle, ROV) 作业^[4-6] 随着技术的进步,为了提高检测效率和降低潜水员的安全风险,使用 ROV 进行水下检测已经成为一种趋势。ROV 依靠脐带缆提供动力,可长时间在水下作业、数据可实时传输;能够针对不同检测作业类型,搭载对应的传感器、检测系统和作业装置,作业效率高,检测结果可靠。ROV 在海洋石油行业中使用广泛,但多数为进口重型设备,使用维护成本高。目前,国内也有国产小型观察级 ROV 在海上风电应用,但缺乏针对性设计,搭载能力有限,一般仅具有水下视频图像功能。

2 质量缺陷及检测方法

2.1 水下钢结构和基础

海上风力发电机的基础形式比较多样,目前大多数为固定式基础,包括高桩承台、单桩、导管架、负压筒、重力式等。近年来国内也有漂浮式风力机投运。海上升压站基础形式主要为多桩导管架^[7]。

2.1.1 结构损伤

水下钢结构发生结构损伤可能有以下几种原因。

1) 单桩基础在施工期因打桩形成的疲劳损伤;水下钢结构长期受风浪、自身重力、震动、焊接应力和海水侵蚀、腐蚀等作用,焊接应力集中区域易产生疲劳裂纹,特别是在导管架结构的管节点接头部位更容易出现。这种裂纹往往自表面或近表面产生,在应力的作用下逐渐向下扩展,对结构安全危害最大^[8]。

2) 施工过程中的撞击或船舶意外碰撞事故,虽然比较少见,但近年来也时有发生。如 2022 年在荷兰和德国的海上风电场内就出现过运维船、施

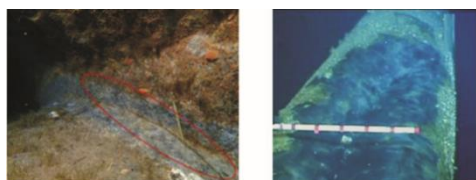
工船失控与风电机组、海上升压站发生碰撞，导致了支撑结构损伤。

水下钢结构现场检测主要包括以下内容。

1) 水下目视检查

水下目视检查是由潜水员或 ROV 开展的外观检查、水下摄像和水下照相。检查内容包括：钢结构及其附件（套笼、立管、电缆护管等）总体状况，检查是否存在弯曲、位移、凹陷及擦伤等缺陷；在发现明显损伤后，需要测量缺陷尺寸，必要时对待测部位进行预清理，然后检查隐藏的损伤。

ROV 进行水下目视检测作业时，由多个高清低照度摄像机固定在可调节云台上，并在合理位置布置泛光灯，提供最大角度范围的照明，也可根据现场情况和作业要求搭载超低照度黑白摄像机、变焦摄像机等光学成像设备。实时视频通过脐带缆传回工作船上的甲板控制单元，从而实现近距离检查。钢结构损伤目视检查照片如图 1 所示。由图 1 可见，水下一般采用物理测量杆或者标尺测量缺陷尺寸。也可采用固定点距激光标尺结合视频图像方式进行测量缺陷尺寸，测量时激光应垂直于被测结构表面，通过被测结构图像长度和激光标尺的图像长度比例及标尺点距进行换算。



a) 节点焊缝开裂 b) 钢结构凹陷测量

图 1 水下钢结构损伤目视检查

Fig.1 Visual inspection for underwater steel structure defects

2) 结构测厚

如在水下外观检查中发现结构损伤、腐蚀、阴极防护不足，或有检测评估要求时，需要由潜水员或者 ROV 使用超声测厚仪测量钢结构的厚度^[9-10]。

水下超声测厚仪一般采用多回波技术，通过计算接收回波反射的延迟时间，去除结构表面涂层厚度以及探头与结构之间海水的影响，得到金属结构厚度。其测量范围可达到 1~250 mm，精度 0.1 mm，最高可穿透 20 mm 厚的涂层。测厚仪可由潜水员手持操作或者通过机械臂、探头支架搭载在 ROV 上作业。检测前需要去除结构物表面不连续附着层，检测过程中需要探头与结构表面尽量紧密耦合，以降低海洋环境中复杂噪声信号对水下超声信号的干扰。

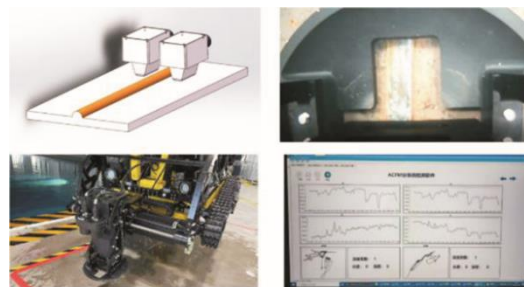
3) 无损探伤

在水下外观检查中，如有怀疑，或有检查要求时，由潜水员或者 ROV 使用无损探伤设备开展水下磁粉探伤^[2,9-10]（underwater magnetic particle testing, UWMT）或交流磁场检测^[9-11]（alternating current field measurement, ACFM），识别结构表面或近表面腐蚀开裂、焊缝开裂、疲劳裂纹等缺陷。

UWMT 是在被检区域洒上磁悬液，磁粉被磁化后移到缺陷上形成堆积。在水中通过荧光磁粉和紫外光源可识别缺陷。检测前需要清理影响磁痕显示的海生物、油漆涂层等表面沉积物，检测过程中需保证磁粉在结构表面的施加与聚集以及在水下黑暗环境中磁痕的观察与评定，时效性差，成本高，并且难以有效获取缺陷的深度信息。

ACFM 是采用电磁感应方法在工件表面形成均匀电流场，感应电流在裂纹、腐蚀等缺陷位置产生扰动，引起空间磁场畸变。通过测量畸变信号，实现缺陷的识别和评估。该技术的优点是均匀感应电流能够在较小开裂及浅层凹坑产生明显扰动，通过高精度传感器可有效获取畸变磁场数据；低频匀强电流场可绕过缺陷底部，检测缺陷深度最高可达 25 mm；均匀感应电流对探头提离高度不敏感，能够穿透 5 mm 厚的附着物和涂层，对表面清理要求不高。因此，该技术尤其适用于海水中钢结构表面的缺陷检测，在海油平台水下结构缺陷检测中广泛应用。英国 TSC 公司开发的商用检测系统，包括各种笔式、焊缝、平面阵列等各种类型的探头，可覆盖 3 000 m 以内水深。国内多家单位也开展了国产化 ACFM 系统的研制、ROV 搭载及现场应用^[6,11]。

在焊缝检测过程中，探头应沿着与焊缝平行的方向移动来探测焊缝的疲劳裂纹。扫查方法如图 2 所示，2 个探头内侧顶端在焊趾上，以相同的速度沿着两侧焊脚进行扫描，需要覆盖焊缝和两侧的热影响区。



a) 探头搭载和焊缝跟踪装置 b) ACFM检测效果

图 2 水下钢结构焊缝 ACFM 探伤
Fig.2 ACFM crack detection for underwater steel structure weld inspection

使用 ROV 进行焊缝检测时需要对其结构和运动控制进行设计：一方面设计其在水下钢结构上的吸附方式，从而保证检测时位置固定；另一方面要设计机械臂或者可动态调节的探头搭载装置（图 2），以实现焊缝追踪扫查。

2.1.2 附着海生物

海生物附着是困扰海洋工程的一大难题。附着海生物增加的重量会导致水下钢结构自身载荷增加，同时海生物附着使桩基直径变大，进而导致波浪的拖曳力增加，环境载荷变大，影响结构的安全性。另一方面，附着的海生物容易产生腐蚀介质或者破坏钢结构的防腐涂层，加剧钢结构腐蚀。

附着海生物检查和清理由潜水员或 ROV 完成。

1) 附着海生物检查

检查海生物的种类、覆盖厚度和分布情况等，当其厚度超过设计硬质海生物的允许量，或安全评估允许量时，应将海生物清除。

附着海生物检查通过目视或视频图像方式判断海生物附着种类与覆盖密度。潜水员可使用直尺测量海生物厚度，ROV 则需要在其前端固定搭载或使用机械臂搭载 L 型卡尺，保持 L 型卡尺末端接触桩身，观察和记录不同位置的海生物厚度。

2) 附着海生物清理

目前，清理水下结构附着海生物主要的方式是由潜水员或 ROV 使用高压水射流和空化射流方式清理。高压水射流是利用高压水流对表面施加的强大压力去除附着的海生物，压力可超过 100 MPa，水下喷枪长度一般超过 1.5 m，重量超过 20 kg，操作不便，安全风险高。空化射流是通过空化喷头内部的特殊结构设计，使水射流束中产生高密度空化泡，利用大量的空化泡在物体表面局部微小区域溃灭产生的强大微射流冲击力去除附着海生物，压力可以降到高压水射流的 1/4，安全风险低^[12]。

由于附着海生物种类的差异，我国北方海域使用空化射流的效果较好，但在南方海域仍然采用高压水射流。由于潜水员作业灵活，目前大面积海生物清理主要由潜水员执行。ROV 通过设计喷头搭载装置或者使用机械臂握持喷头，可以完成待检测位置附近小面积海生物的清理工作。

2.1.3 阴极保护不到位

水下钢结构的阴极保护方式主要有牺牲阳极保护和外加电流阴极保护（ICCP）2 种。海水中经

保护的钢结构电位必须低于 -0.8 V ，理想的电位为 $-0.9\sim -1.0\text{ V}$ （相对 Ag/AgCl ），电位过高意味着防腐保护效果不足，过低则容易形成释氢裂纹。

阴极保护效果检查如图 3 所示。阴极保护效果的现场检测由潜水员或 ROV 完成，具体检测内容如下。

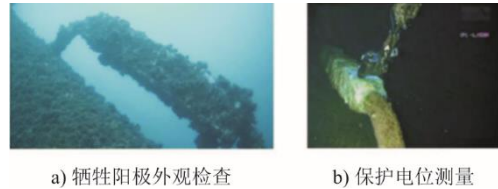


图 3 阴极保护检测
Fig.3 Inspection of cathodic protection

1) 水下目视检查

检查牺牲阳极是否有丢失、连接是否牢靠，检查表面的海生物附着和腐蚀情况，测量牺牲阳极的周长及总长度，判断是否存在过量耗蚀。检查方式与 2.1.1 节的结构损伤水下目视检查方式相似。

2) 阴极保护电位测量

使用电位测量仪测量牺牲阳极和钢结构的保护电位。重点测量在外观检查中牺牲阳极失效、耗蚀严重以及保护效果弱的位置（例如每 2 块阳极之间位置，或结构部件尺寸变化的地方、管节点处）。通常电位测量需要按位置平均分布选取 10% 的牺牲阳极和覆盖每一水平层的钢结构。

电位测量仪是由探头和 Ag/AgCl 参比电极组成的一体化 CP 探针，CP 探针可由潜水员手持或安装在 ROV 上。测量前需将待测位置的海生物清理干净，确保测量时 CP 探针与钢结构紧密接触，从而获得稳定读数。测量前后应使用饱和甘汞电极校准。

2.1.4 基础防冲刷措施失效

在海上风电桩基础建设施工过程中，为降低局部冲刷的影响，需在桩基周围海床面采用抛填、固化土、土工布等措施进行冲刷防护。但由于施工不到位或受到长期冲刷后失效，导致进一步形成冲刷坑^[13]。冲刷坑的形成和扩大将减小桩的入泥深度，降低桩基承载力；使桩的悬臂长度增加，水平变形加大，增加倾覆弯矩；降低机组支撑结构的自振频率，严重时将导致机组停机^[1]。冲刷同时也会导致接入端海缆的裸露和悬空不断扩大，悬空海缆承受内部作用力、外界水压力以及振动等，容易发生损坏失效。

基础冲刷检测的主要内容为测量海底结构物附近冲刷堆积位置、面积大小及分布范围、冲刷坑深度和堆积高度，检查周围是否有残骸、杂物等。

1) 水下目视检查

由潜水员或者 ROV 使用物理测量杆或者激光标尺测量结构特定位置至海底的距离。测量精度较低, 并且只能测量单个位置, 无法连续测量从而覆盖整个结构情况。

2) 船载侧扫声呐扫测

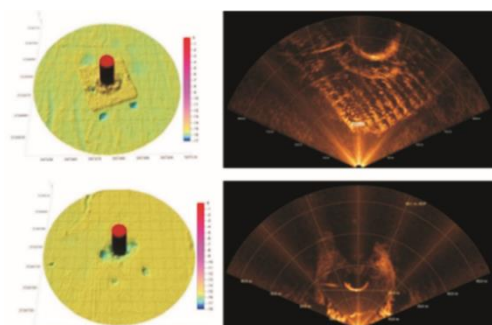
侧扫声呐以拖鱼(拖曳)形式悬挂于工作船尾, 根据换能器发出并接收到的回声信号生成二维平面图像, 分析海底地形地貌和基础冲刷情况。优点是工作船扫测速度快, 扫测面积大, 图像较清晰, 能够获得冲刷位置、面积以及裸露的海缆, 但无法获得冲刷深度和堆积高度等垂直方向数据。

3) 船载多波束测深

多波束测深仪的换能器以船舷悬挂式安装在测量船中部, 使用高精度光纤罗经及运动传感器实时修正换能器姿态, 并通过数据处理后实现海底地形测量, 获得三维可视化数据。优点是覆盖面大, 能够直观量化海底地形地貌和基础冲刷情况, 缺点是干扰因素多, 数据需要后处理, 以及海底的细致特征捕获效果不佳^[14]。

4) ROV 搭载多波束图像声呐及单波束机械扫描声呐扫测

多波束图像声呐布置在 ROV 的前端, 换能器发出多个垂直分布的窄波束, 并采集多个波道回波数据, 生成实时二维声学图像。单波束机械扫描声呐的换能器固定在 ROV 上方, 测量时 ROV 稳定停靠在海底表面, 换能器以一定频率发射单束声波并接收回波信号, 完成当前位置采集后以步进方式旋转一个预设角度后探测并不断重复, 可获得海底 360° 平面图像。与船载侧扫声呐扫测类似, 这 2 种方法均无法获取基础防冲刷措施的高度/深度数据^[15]。图 4 展示了某风电场 2 台机组单桩基础不同年度的检测图像。



a) 2019年船载多波束声呐 b) 2023年ROV搭载实时声呐

图 4 单桩基础冲刷检测

Fig.4 Scour detection of monopile foundation

由图 4 可见: 单桩基础的保护砂被处于较完整状态, 保护效果良好; 保护砂被在 2019 年已经失效, 到 2023 年冲刷进一步扩大, 形成了 1 个直径达到 7.6 m 的冲刷坑。

5) 船载/ROV 搭载三维声呐扫测

实时三维成像声呐可采用不锈钢支架固定于船舷处, 也可安装在 ROV 前部使用。其检测原理是声呐利用相控阵技术产生上万条同时存在的波束, 并根据回波数据建立实时的三维点云图像。优点是图像实时、直观形象, 测量精度较高, 但设备非常昂贵^[14,16]。

三维机械扫描声呐主要安装在 ROV 上部使用。检测原理是换能器通过 1 次发射声波和接收回波, 生成垂直扇形扫描区域内的 1 个二维图像, 再通过水平方向 360° 旋转扫描生成三维点云图像。换能器还能向上或向下倾斜一定角度后再进行扫描, 形成球形区域扫描。船载/ROV 搭载三维声呐扫测优点是测量精度更高, 但测量时需要将 ROV 长时间稳定停靠在海底表面, 进行高精度扫描时间更长, 最长可超过 10 min, 并且由于存在中心盲区, 需要合理规划扫测位置^[6]。使用三维机械扫描声呐可以在风力机和升压站基础附近不同位置进行多次扫测, 通过对三维点云数据的配准和拼接处理, 重建生成一个完整的海上升压站水下结构三维数字可视化模型如图 5 所示。

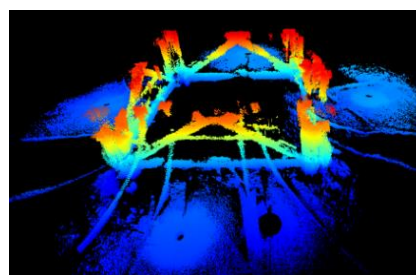


图 5 海上升压站水下结构三维测量和重建

Fig.5 Three-dimensional measurement and reconstruction for underwater structure of offshore substation

2.2 海底电缆

目前, 海上风电使用的海底电缆主要是三芯交联聚乙烯(XLPE)绝缘的交流海缆。目前, 虽然高压直流海缆的项目比较少, 但未来 5~10 年高压直流海缆的市场将会激增。

2.2.1 接入端海缆

海缆接入风力机和海上升压站的形式一般有 2 种: 一种为适用各种基础形式的 J 型管喇叭口

结构^[17]；另一种为针对单桩基础的倒刺结构海缆保护装置^[18]。接入端海缆的主要质量问题包括海缆保护装置未能安装到位，海缆保护装置失效，以及接入端海缆的悬跨长度、裸露长度、弯曲半径、接入夹角超出设计要求。海缆接入端检测内容如下。

1) 接入端目视检查

检查接入端海缆及其保护系统完整性，确认其有无缺失和损坏。潜水员和 ROV 可通过水下摄像进行检查，海缆保护系统目视检查如图 6 所示。由图 6 可以观察到，弯曲限制器损坏，中心夹具脱出。在水质浑浊海域，高频浑水声呐安装在 ROV 前部或由潜水员手持，可获得清晰的实时声学图像。由图 6 可以观察到海缆处于裸露状态，弯曲限制器损坏。潜水员也可采用深入喇叭口内部的水下探摸来验证检查结果。

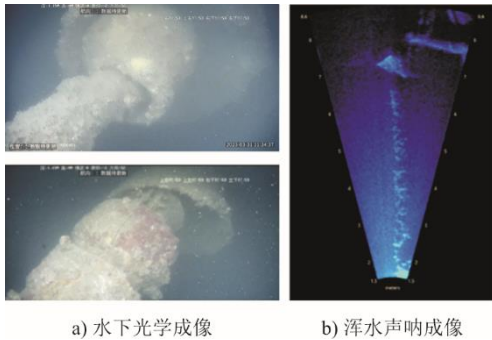


图 6 海缆保护系统目视检查
Fig.6 Visual inspection of submarine cable protection system

2) 裸露海缆测量

使用 2.1.4 节中侧扫声呐、多波束图像声呐及单波束机械扫描声呐可获得海缆位置，测量海缆的悬跨、裸露长度以及海缆的弯曲半径。图 7 为裸露海缆检测。

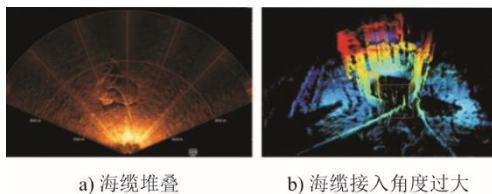


图 7 裸露海缆声学检测
Fig.7 Acoustic detection of unburred submarine power cables

由图 7 可见，通过图像声呐发现海缆缠绕堆叠在海床表面，属于施工遗留问题。使用多波束测深、各类三维声呐获得的三维点云数据，对其进行处理和计算，可获得接入海缆的悬跨高度、接入角度、

入泥角度等数据。由图 7 还可见，海缆和喇叭口的夹角已经超出设计允许值，发生了物理磨损导致海缆失效的概率较高。

2.2.2 掩埋海缆

由于施工不到位或长期受海流影响导致掩埋海缆出现裸露和位移，从而更容易受到船只抛锚和渔业作业的破坏，一旦发生故障很难在短时间内确定故障点的精确位置^[19]。掩埋海缆的检测内容如下。

1) 裸露段海缆检测

检查和测量掩埋海缆裸露部分的情况。使用 2.1.4 节中的各类型声呐能够获得裸露海缆位置、悬跨、裸露的长度、弯曲半径等数据。潜水员和 ROV 通过水下目视检查裸露海缆的外观情况^[19-20]。

2) 路由埋深检测

测量掩埋海缆敷设轨迹和埋深。常用检测方式包括船载浅地层剖面仪、船载/ROV 搭载合成孔径声呐、ROV 搭载磁力仪。

(1) 船载浅地层剖面仪

换能器以船舷悬挂式安装在测量船中部。检测原理是换能器向水下发射大功率低频脉冲声波，部分声波抵达海底后继续向地层深处传播，当遇到电缆发生绕射，产生了双曲线形态的绕射弧（图 8），根据弧顶点位置计算位置和埋深^[21]。现场测量时船舶以 50 m 间隔沿测线反复垂直穿越海缆，获取海缆交叉点位置坐标和该点埋深。该方法优点是分辨率和位置精度较高，不受是否通电等因素的影响，但无法获得连续埋深，并且由于海缆含有较多纤维及塑料，与地层间的声阻抗差异小，在海缆掩埋较深的情况下很难被探测到。

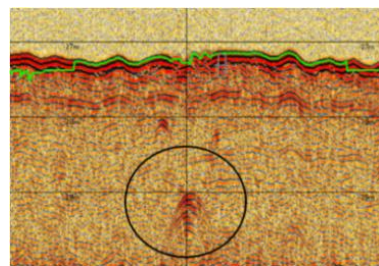


图 8 浅地层剖面仪成像
Fig.8 Acoustic imaging by sub-bottom profiler

(2) 船载/ROV 搭载合成孔径声呐

换能器以拖曳方式搭载在工作船上或直接搭载在 ROV 上，利用小孔径基阵，通过相干叠加处理，合成虚拟大孔径的基阵，能够工作在更低的频率，因此具有一定的海床穿透能力，可探测到掩埋

海缆的形态，从而获得其路由数据，但无法获得海缆的准确埋深^[22-23]。

(3) ROV 搭载磁力仪

传感器主要由 2 个基阵组成，每个基阵采用完全相同的 3 个线圈组成的探头，并相互间成正交放置，基阵布置在 ROV 前部左右两侧，用于捕获海缆内工频电流磁场信号的特征。检测原理是将三芯电缆看作 3 条无限长直通导线，根据叠加定理，空间内磁感应强度等于各相线芯在该点磁感应强度的矢量叠加。图 9 为掩埋海缆的磁法检测。

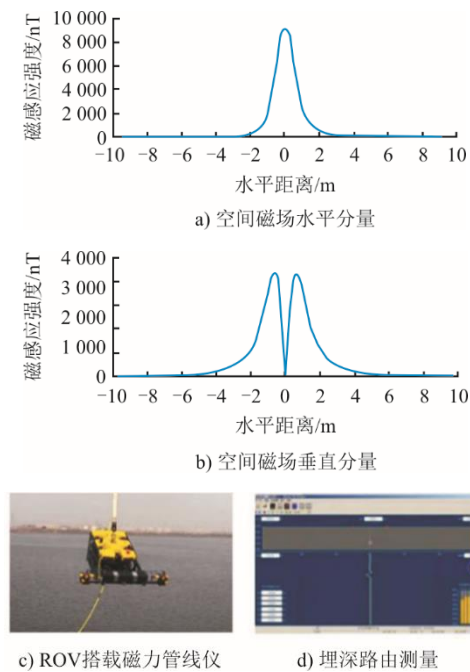


图 9 掩埋海缆的磁法检测

Fig.9 Magnetic detection of buried submarine power cables

由图 9 可见：海缆感应磁场水平分量随水平距离减小而增大，在海缆正上方最大；感应磁场垂直分量随水平距离减小增大，至与埋深大小相等时开始减小，在海缆正上方为零。

据此特征，探头位于海缆正上方时可计算埋

深，当探头偏离海缆正上方时，可以通过计算左右 2 个探头分别和海缆夹角及其偏距离，从而获得海缆坐标及埋深。在现场检测中，ROV 应搭载超短基线水下定位系统，从而获得其水下位置以及海缆的经纬度坐标。图 9 中，操作 ROV 沿着海缆路由的大致走向前行，可以检测到海缆位置和埋深。但使用此方法需要 ROV 母船具备动力定位能力，能够时刻跟随 ROV 稳定前进^[24]。

3) 故障点定位

在掩埋海缆发生故障后，确定故障点准确位置的经纬度坐标。掩埋海缆出现的主要故障包括船舶锚害物理损伤和电气故障（过电压、短路等）。

如果锚害损伤较严重，会导致海缆已经被船舶勾出海床，或仍处于掩埋状态但已经发生较大的弯曲形变。前一种情况可通过 2.2.1 节中裸露海缆检测方式确定故障点，后一种情况可以采用路由探测中使用合成孔径声呐的方法进行检测。

如果锚害损坏较轻或出现的是电气故障，从外观形态上无法判定故障点位置，此时需采用磁学检测手段。具体方法为：在海底电缆一侧施加特定频率的交流电信号，另一侧接地，由工作船或者 ROV 搭载磁力仪，沿海缆大致路由方向走“S”型路径前进，以垂直切割方向通过海缆时可检测到“零值”信号，然后沿返回方向走小“S”路径直至无法检测到位置信号，再切换为前进方向，检测到位置信号后再次返回，多次往返后即可确定故障点位置^[25]。

2.3 检测方法分析及建议

针对海上风电水下资产的质量缺陷有多种检测手段和检测技术，每种手段和技术的优势和局限性不同，需要根据现场的实际情况和检测需求进行选择。很多时候需要通过多种检测手段结合及多传感器数据融合的方式，才能精准掌握水下资产的状态^[26]。针对水下资产的各类质量缺陷的检测技术总结分析以及建议见表 1。

表 1 不同缺陷检测方法分析及建议
Tab.1 Analysis on different inspection methods and the recommendations

对象	类别	主要采用		补充采用			理由
		手段	技术	手段	技术	内容	
水下钢结构和基础	结构损伤	ROV	光学成像、水声成像	缺陷位置、大小	潜水员	磁粉探伤	结构表面和近表面缺陷
			超声测厚	金属厚度			
			ACFM 探伤	表面和近表面缺陷			
海生物附着	ROV	光学成像	海生物面积、厚度	潜水员	水下探摸	海生物附着情况	
		高压水射流、空化射流	海生物清理				

续表

对象	类别	主要采用		补充采用			理由	
		手段	技术	手段	技术	内容		
防腐失效	ROV		光学成像	牺牲阳极完整性	潜水员	光学成像	牺牲阳极完整性	
			电位测量	牺牲阳极和钢结构电位		电位测量	牺牲阳极和钢结构电位	
基础冲刷	工作船	船载多波束扫测	冲刷面积、深度	ROV	光学成像、 水声成像	基础外观 详细调查	工作船速度较快, 可补充 ROV 开展精细化的冲刷检测	
					三维声呐扫测	冲刷面积、深度		
海底电缆	海缆接入端	ROV	海缆保护系统 完整性检查	潜水员	水下探摸	喇叭口内部中心 夹具情况	ROV 搭载多种检测系统作业, 特殊环境和位置可补充潜水员探摸	
			三维声呐扫测		裸露海缆状态测量			
	掩埋海缆路由埋深	工作船	多波束声呐测深	海缆裸露	ROV	磁力仪测量	海缆埋深、路由	工作船速度较快, 当海缆埋深较深或其他船载无法满足情况下可由 ROV 执行
			浅剖成像	海缆埋深、路由				
			合成孔径声呐成像	海缆路由				
海缆故障点定位	工作船	多波束声呐测深	裸露海缆外观形态	ROV	光学成像、 水声成像	裸露/掩埋海缆 表面外观形态	工作船速度较快, 在确定大致的故障点位置后可由 ROV/潜水员进行故障点精确定位	
		合成孔径声呐成像	掩埋海缆外观形态		磁力仪测量	故障点位置磁信号精确探测		
		磁力仪测量	故障点磁信号	潜水员	水下探摸	故障点损伤位置		

3 结语与展望

本文针对海上风电水下资产常见的质量缺陷和常用的检测手段及检测技术, 进行了全面深入的分析, 结合现场工作中的实际案例分析了不同的检测技术的适用性和局限性, 针对海上风电特点和水下资产不同类型质量缺陷提出了完整、有效的检测方法, 对保障海上风电场的安全稳定运行具有重要的技术指导意义和参考价值。

随着我国海上风电继续向着深远海发展, 水下资产的建设和运维面临着更大挑战, 需要进一步开展以下工作。

1) 加强海上风电水下资产现场检测评估标准体系建设 近年来我国海上风电发展过程中采用的水下钢结构、基础和海底电缆形式和相关技术在快速更新, 各种新的检测技术和装备也在不断应用, 亟需修订原有标准或制定新的标准, 规范海上风电的水下检测工作。

2) 加强海洋环境下测量仪器的国产化工作 目前, 大部分测量仪器及传感器均为国外进口, 虽然已有国内厂家开展了国产化替代, 但性能和可靠性还有较大差距。特别是在深远海、高端传感器领域, 潜在的市场垄断和技术封锁不可忽视, 国产仪器设备需要通过不断地应用和研发实现迭代升级。

3) 持续提升水下检测的智能化水平 目前, 国内的水下检测工作还离不开人的深度参与, 例如潜水员、ROV 领航员、工作船驾驶员等。欧洲已率先开展无人化作业探索, 2022 年, EDF (法国电力集

团) 联合 ORCA (海上机器人资产认证中心) 使用 ROV 首次实现了风电场水下基础的自主检测。因此, 未来应持续探索针对水下钢结构海生物自动清理机器人、具有全自主水下检测能力的 ROV、具备全自动收放 ROV 和起降巡检无人机的智能化无人船, 从而构建海上风电“空海潜”一体化的智能检修运维体系, 提升运维效率和发电可靠性, 降低运维的安全风险, 推动我国海上风电持续发展。

[参考文献]

- [1] 樊启祥, 陈晓路, 王鑫. 海上风电项目全生命周期资产管理[J]. 项目管理评论, 2022(2): 72-77.
FAN Qixiang, CHEN Xiaolu, WANG Xin. Asset management of the whole life cycle of offshore wind power projects[J]. Project Management Review, 2022(2): 72-77.
- [2] 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.
WAN Yuanchen, WANG Kai, CHU Yuefeng. Analysis on method and application of submarine cable detection[J]. Ship Engineering, 2020, 42(12): 20-25.
- [3] 陈凤生, 倪鹏, 张勇, 等. 近海浮式装置水下检验质量控制与应用[J]. 中国水运, 2022(8): 56-58.
CHEN Fengsheng, NI Peng, ZHANG Yong, et al. Underwater inspection quality control and application of offshore floating devices[J]. China Water Transport, 2022(8): 56-58.
- [4] 王童豪, 彭星光, 潘光, 等. 无人水下航行器的发展现状与关键技术[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(4): 52-64.
WANG Tonghao, PENG Xingguang, PAN Guang, et al. Development and key technologies of unmanned underwater vehicles[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017, 1(4): 52-64.
- [5] 田雨, 李浩楠, 张洪星, 等. 水下机器人在海上单桩基础风机水下检测中的应用[J]. 自动化应用, 2022(11): 122-127.
TIAN Yu, LI Haonan, ZHANG Hongxing, et al. Application of underwater robot in underwater detection of offshore fan with single pile foundation[J].

- Automation Application, 2022(11): 122-127.
- [6] 童博, 刘滨江, 姚中原, 等. ROV 在海上风电水下检测的应用[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊 1): 151-156.
TONG Bo, LIU Mingjiang, YAO Zhongyuan, et al. Development and implementation of a remote-operated vehicles for underwater detection for offshore wind farms[J]. Ship Engineering, 2023, 45(Suppl.1): 151-156.
- [7] 张宝锋, 赵勇, 韩斌. 海上升压站建造阶段质量控制[J]. 热力发电, 2019, 48(7): 137-141.
ZHANG Baofeng, ZHAO Yong, HAN Bin. Quality control of offshore substation construction in construction stage[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7): 137-141.
- [8] 张钢, 冯宝平, 刘碧燕. 浅谈海上风电钢构基础腐蚀疲劳及早期检测[J]. 风力发电, 2015(5): 47-51.
ZHANG Gang, FENG Baoping, LIU Biyan. Discuss of steel structure foundation corrosion fatigue and early detection in offshore wind farms[J]. Wind Power, 2015(5): 47-51.
- [9] 胡春阳. 海底管道外检测技术现状综述[J]. 化工装备技术, 2023, 44(5): 60-63.
HU Chunyang. Overview of the current situation of external inspection technology for submarine pipelines[J]. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(5): 60-63.
- [10] 王鹏, 朱红波, 刘润兵, 等. 水电站过流部件涂层下裂纹检测方法对比[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 113-117.
WANG Peng, ZHU Hongbo, LIU Runbing, et al. Comparison of detection methods for cracks under coating of overflow components[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 113-117.
- [11] 袁新安, 李伟, 齐昌超, 等. 基于交流电磁场的水下结构物裂纹尺寸及剖面高精度评估方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 109-115.
YUAN Xin'an, LI Wei, QI Changchao, et al. High-precision evaluation method of crack dimension and profile for underwater structures based on ACFM technique[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2020, 44(6): 109-115.
- [12] 王继祥, 张增猛, 李洪波, 等. 船体表面海生物水下清洗机器人研究现状及关键技术进展[J]. 船舶工程, 2024, 46(2): 146-164.
WANG Jixiang, ZHANG Zengmeng, LI Hongbo, et al. Research status and key technology progress of marine biological underwater cleaning robot on hull surface[J]. Ship Engineering, 2024, 46(2): 146-164.
- [13] 李亚军, 毕明君. 海上升压站导管架基础的冲刷试验研究[J]. 南方能源建设, 2018, 5(增刊 1): 123-128.
LI Yajun, BI Mingjun. Study on scour test of jacket foundation for offshore substation[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(Suppl.1): 123-128.
- [14] 陈雷, 王春亮, 黄家勇, 等. 多波束和三维声呐在水下构筑物基础冲刷检测中的综合应用[J]. 测绘通报, 2022(增刊 2): 126-129.
CHEN Lei, WANG Chunliang, HUANG Jiayong, et al. Comprehensive application of multi-beam and three-dimensional sonar in foundation scour detection of underwater structures[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(Suppl.2): 126-129.
- [15] 陈建腾. 基于成像声呐的平面形桥墩裂缝和基础冲刷检测[D]. 福州: 福州大学, 2021: 1.
CHEN Jianteng. Detection of crack and foundation scour of planar bridge piers based on imaging sonar[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021: 1.
- [16] 李斌, 金利军, 洪佳, 等. 三维成像声呐技术在水下结构探测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 184-188.
LI Bin, JIN Lijun, HONG Jia, et al. Application of three-dimensional imaging sonar technology in detection of underwater structure[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(3): 184-188.
- [17] 陶伟, 刘滨江, 周国栋, 等. 海床冲刷对海上风电海缆及弯曲限制器的影响研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 186-193.
TAO Wei, LIU Mingjiang, ZHOU Guodong, et al. Influence of scour on subsea cables and bend restrictors of offshore wind farm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(11): 186-193.
- [18] 肖斌. 海上风电单桩基础海缆孔失效处理方法[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊 1): 131-133.
XIAO Bin. Treatment method of the invalid submarine cable hole of offshore wind power single pile foundation [J]. Ship Engineering, 2023, 45(Suppl.1): 131-133.
- [19] 冀大雄, 周佳龙, 钱建华, 等. 海底电缆检测方法发展现状综述[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 36-49.
JI Daxiong, ZHOU Jialong, QIAN Jianhua, et al. current development review of submarine cable detection methods[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 36-49.
- [20] 岑贵锦, 蒋道宇, 张维佳, 等. 海底电缆检测技术方法选择分析[J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 85-91.
CEN Zhenjin, JIANG Daoyu, ZHANG Weijia, et al. Analysis on selection of submarine cable detection technology[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 85-91.
- [21] 李晶. 海底电缆外部探测方法与应用浅析[J]. 水道港口, 2018, 39(3): 365-369.
LI Jing. Analysis on method and application of submarine cable detection[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(3): 365-369.
- [22] 李海森, 魏波, 杜伟东. 多波束合成孔径声呐技术研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1760-1769.
LI Haisen, WEI Bo, DU Weidong. Technical progress in research of multibeam synthetic aperture sonar[J]. Acta Geodaetica et Cartographica, 2017, 46(10): 1760-1769.
- [23] 杨敏, 宋士林, 徐栋, 等. 合成孔径声呐技术以及在海底探测中的应用研究[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(2): 51-55.
YANG Min, SONG Shilin, XU Dong, et al. Research on the synthetic aperture sonar technology and its application in seafloor exploration[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(2): 51-55.
- [24] 蔡璇, 许宝华, 李道鹏, 等. 海底缆线综合探测方法及应用[J]. 水利水电快报, 2023, 44(10): 36-40.
CAI Xuan, XU Baohua, LI Daopeng, et al. Comprehensive method and application for submarine cable detection[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(10): 36-40.
- [25] 黄小卫, 张维佳, 郭强, 等. 水下机器人在海底电缆巡检及故障查找中的应用与探讨[J]. 高电压技术, 2018, 44(增刊 1): 1-6.
HUANG Xiaowei, ZHANG Weijia, GUO Qiang, et al. Application and discussion of underwater robots in submarine cable inspection and fault finding[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(Suppl.1): 1-6.
- [26] 海上风电场缆控水下机器人检测技术规范: T/CEEMA 0203—2023[S]. 北京: 中国电力设备管理协会, 2023: 11.
Technical specification for underwater inspection with remotely operated vehicle in offshore wind farms: T/CEEMA 0203—2023[S]. Beijing: China Electrical Equipment Management Association, 2023: 11.

(责任编辑 杨嘉蕾)