

海上风电工程结构安全监测体系框架设计

常增亮¹, 马超¹, 麻德明², 刘杨², 高兴国¹

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013; 2. 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061)

摘要:文章针对海上风电工程结构安全监测的需求,在系统回顾了目前的主要监测现状及存在的监测难点的基础上,初步构建了水上、水下一体化安全监测体系基础框架,阐述了主要的工作流程,重点探讨了海上风电工程安全监测中的精密单点定位(PPP)技术、高程传递、多传感器集成、精密水下定位技术、水下摄像机标校、水下三维激光点云快速建模、水下桩基全景影像与点云数据匹配、多波束与侧扫声呐数据融合等关键技术,以期对海上风电工程结构设施管控、变化监控和防灾减灾提供新的应急方案和技术支撑。

关键词:海上风电;安全监测;关键技术;框架设计

中图分类号:P7

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)07-0068-05

Framework Design of Structural Safety Monitoring System for Offshore Wind Power Engineering

CHANG Zengliang¹, MA Chao¹, MA Deming², LIU Yang², GAO Xingguo¹

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: According to the requirements of offshore wind power engineering structure safety monitoring, the basic framework of safety monitoring system was initially constructed based on the systematic review of the main monitoring methods and existing monitoring difficulties. The main work flow was described. The key technologies in safety monitoring of offshore wind power projects, such as precision single point positioning (PPP), elevation transfer, multi-sensor integration, precise underwater positioning technology, underwater camera calibration, 3D laser point cloud rapid modeling, underwater pile foundation panoramic image and point cloud data matching, multi-beam and side-scan sonar data fusion, were discussed. The technical framework system was expected to provide new emergency plans and technical support for structural facilities management and control, change monitoring and disaster prevention and reduction of offshore wind power projects.

收稿日期:2020-08-17;修订日期:2021-06-17

基金项目:海上风电工程结构形变、裂缝及冲刷监测方法研究(37-2020-19-K0007)。

作者简介:常增亮,正高级工程师,硕士,研究方向为海洋测绘

通信作者:麻德明,高级工程师,研究方向为海洋测绘及形变监测

Keywords: Offshore wind power, Safety monitoring, Key technology, Framework design

0 引言

随着世界能源的紧缺和人们对低碳环保需求的不断提高,风能作为清洁能源愈发受到青睐,风电技术逐渐由陆上延伸到海上,根据全球海上风电现状统计数据,风能发电仅次于水力发电占到全球可再生资源发电量的16%^[1],已经成为当今不可或缺的极其重要的新能源之一^[2]。同陆上风电场相比,海上风电凭借海上风资源的稳定性和发电功率大的特点,近年来正在世界各地飞速发展,包括英国、德国、丹麦等国家都纷纷加快了对海上风电的开发速度,已成为不少欧洲国家争相发展的方向,可以说欧洲的海上风电在全球一枝独秀^[3]。此外,韩国和日本在发展海上风电方面也都不甘居人后。

中国海上风电虽然起步较晚,但发展异常迅猛,东部沿海地区开发规模从北到南不断扩大,单机容量越来越大,装机规模快速增长,场址逐渐从潮间带开始向近海深水区域发展,截至2017年年底装机规模已跃居全球第三。在国家海洋发展战略和“一带一路”的支持下,国际间的海上风电工程建设合作也将迎来蓬勃发展的新局面。随着海上发电这一清洁能源技术的不断推进,沿海风电遍地开花,风机数量也不断增加,在风电场的建设和运维过程中,长期受海洋复杂环境的影响,风机倾斜、断裂、桩基不均匀沉降及腐蚀等事故时有发生,将严重影响和威胁海上风电的安全性和耐久性。一旦发生事故,将造成巨大的损失,海上风电工程的安全稳定运行越发引起人们的重视,如何通过技术手段定期对风机倾斜、桩基沉降、裂缝等形变状况的监测与定量评估,实现早期故障的预警,是海上风电安全检测的重点和难点。因此,有必要建立海上风电水上和水下一体化安全监测技术体系,及时、准确掌握海上风电工程形变信息,可为海上风电场的管理和保护措施制定提供参考依据和技术支持。

1 监测现状及难点

海洋平台作为海洋开发过程中最重要的基础

设施,具有较高的投资成本和维护成本,其结构长期经受海生物的附着、地基冲刷以及环境载荷等的相互作用,使得结构承载能力不断下降。海洋工程结构安全监测问题已经成为避免环境灾害以及经济损失、确保安全健康服役所必需面临的问题,因此,定期健康监测和诊断就成为保证正常生产和安全操作的最有效的手段。海洋工程安全监测,即通过在海洋平台上安装各种类型传感器,获得各种关键信息,并从中提取特征数据,最终对其工作状态和损伤情况进行判断。安全监测是一个多学科交叉的领域,日益受到国内外学者的关注,并已成为国内外研究的热点和难点。海洋工程安全监测的研究开始于20世纪70年代,目前相关的研究报道,大多基于海洋钻探平台和传感器技术,研究领域主要涉及海洋环境载荷监测、腐蚀及裂纹的监测以及结构应力与变形监测等^[4],采用的监测方法也因监测内容而各异,总体上可以分为局部损伤检测法和基于振动的整体损伤探测法^[5]。随着海洋工程结构日益大型化、复杂化和智能化以及各种传感器技术的不断进步,监测内容和监测手段也越来越丰富,不再是单纯的载荷监测,而是向着结构损伤检测、损伤定位和结构寿命的预测等方向发展^[6]。

虽然,随着当前监测技术的进步,取得了一定的研究进展,但仍然存在一些亟待解决的问题。由于海上风电场一般远离大陆,缺乏统一的测绘基准,亟须解决高程传递问题,所以对于固定式海洋平台的沉降监测一直是一个难点,而海上风电场运行监控和状态评价主要参考陆上风机,只进行风机的运行状态监测,仅在试验风机的基础和塔筒的少量部位进行了应力应变监测,远未实现针对海上风电场结构体系的状态监测,不能满足对海上风电场结构体系进行状态评价的要求。对海洋电力工程结构的安全监测,特别是基于GNSS监测(水上部分)、精密水下定位监测和三维扫描声呐测量监测结合的变形监测方法、海底结构冲刷监测领域,鲜有研究和报道。有关海上构筑物结构安全检测的研究目前尚处于基础性的探索阶段,距离实用性目

标尚有很大的差距。因此,亟须开展海洋电力工程结构安全监测体系框架研究。

2 总体框架

海上风电工程结构安全监测,总体目标是针对海上风电工程结构安全监测需求和技术瓶颈,综合利用 GNSS、精密水下定位、水下机器人以及三维扫描声呐技术手段,通过对关键技术攻关,重点解决精密水下定位中海底信标的精确安装和浅海声速精密改正、水下相机标校、多波束与侧扫声呐数据融合等技术难题,建立一整套从水上到水下的安全监测技术体系,按照既定技术流程获取反映海上风电平台环境激励和结构响应状态的特征信息,监测海上风电工程的工作性能和评价海洋平台的工作条件,从而为海上风电工程安全运维提供科学依据。主要技术流程包括 6 个部分,即资料收集与整理、统一海洋测绘基准、GNSS 定位与导航、首次监测数据收集与分析、监测方法优化与改进、定期监测数据收集与分析、监测结果对比分析与评价、安全运维预警与防护措施(图 1)。

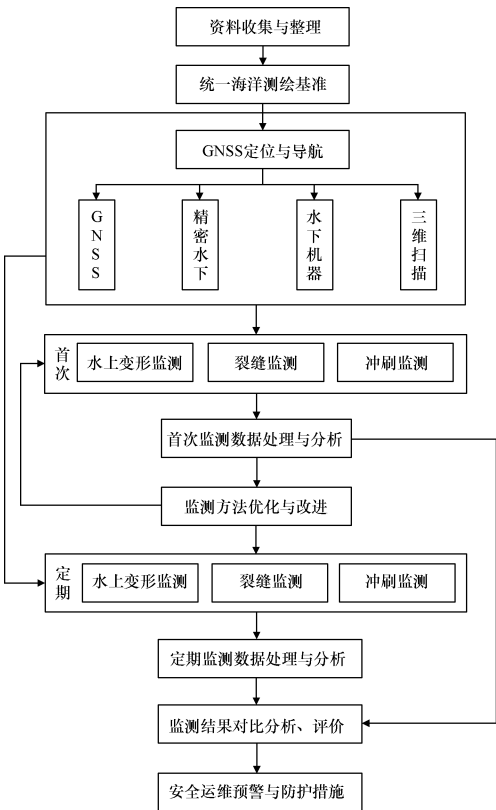


图 1 监测体系框架

3 关键技术

3.1 精密单点定位 (PPP) 技术

海上风电工程通常远离大陆,常规的定位方法无法获取高精度位置信息,而 PPP 技术作为一项 GNSS 定位新技术,在低轨卫星精密定轨、高精度坐标框架维持和海洋测绘等诸多方面得到了广泛的应用^[7],同样适用于海上风电工程安全监测。其技术重点解决包含多种参数的数学模型选择与解算、高精度误差改正模型构建、整周模糊度解算和观测数据的周跳探测与修复,以获取高精度坐标信息。

3.2 高程传递

采用高精度 GNSS 定位技术,结合我国现有陆地、海洋重力资料及其他重力场信息和数据成果,并运用国内外确定大地水准面的严密理论和算法来确定高精度的局部大地水准面^[8],将我国高程基准从沿海海上风电场控制中心传递到海上风电场机组区域。

3.3 多传感器集成

主要解决不同采集频率、不同安装位置 and 不同类型的测量传感器在时间和空间上的同步^[9],以及多传感器数据的时空对准,为水上、水下一体化监测系统的实际应用奠定基础。

3.4 精密水下定位技术

精密水下定位是高精度三维扫描声呐测量系统和水下机器人监测的前提。首先针对海底控制点精密定位,需根据试验区情况确定船的航迹,确保基于最优的几何结构进行定位;同时需要利用自适应的方法采取合适的差分方法,最大限度地削弱观测值中的周期项误差,提高定位精度。另一方面,水声定位中的主要误差来源是海水中的声速以及信号传播时间观测值,前者与海洋的实际环境相关,需要结合声信号在水中的传播规律,研究声速剖面自动分层跟踪改正方法;后者与设备相关,虽然设备的硬件延迟会在实验室进行标定,但它会随环境发生不规则的变化,故需要研究观测值分离硬件延迟的方法;纯粹的水声定位由于单侧交会的模式,会出现垂直方向结果发散的情况,需要研究压力传感器进行高程约束的方法,提高垂直方向结果的精度。因此,高精度的海底定位技术需要精细化

的误差处理步骤作为支撑。海底控制点标定好后,由于水声是时空相关的函数,它便成为限制海底精密定位应用的主要因素。需要从海洋机理出发,对海水中的声速进行层析,自适应地建立区域声速场模型,为后续海底精密定位监测应用奠定基础。

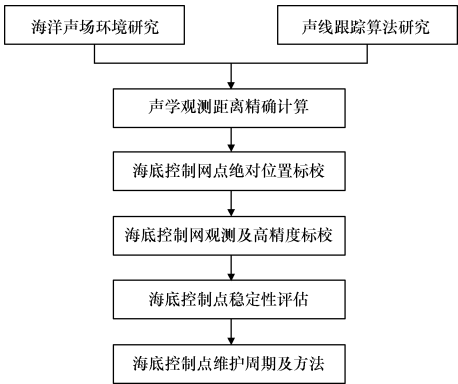


图 2 精密水下定位技术流程

3.5 水下摄像机标校

摄像机成像时,图像中的像素点是空间中物体的点在摄像机平面上的投影,图像点与空间点之间具有映射关系,通过建立摄像机的成像几何模型能够实现图像坐标系到空间坐标系的转换^[10-11],建立摄像机成像模型所需的参数称为摄像机标校,标定的精度将会直接影响海底构筑物发生缝隙位置估算过程的精度。

水下机器人(ROV)在进行摄像机标校的基础上,通过精密水下导航定位技术,探测海底构筑物全幅影像,对图像进行去噪、增强、融合等处理后,通过影像拼接与裂缝识别技术,提取可能存在风电桩基缝隙信息。

3.6 水下三维激光点云快速建模

通过对原始点云进行粗差剔除、滤波、重采样和高精度空间配准等数据处理步骤,实现整个水下桩基的点云拼接,然后联合解算生成 DEM,从而得到点云产品。

3.7 水下桩基全景影像与点云数据匹配

对桩基点云数据进行融合解算获取高精度绝对坐标点云,选择光束法平差或直接线性变化等最适合的方法对点云和全景影像进行配准。经过配准后的全景影像,影像上像素可以对应匹配到背后空间三维点云,基于影像可直接测图,提取特征点

和地理要素。

3.8 多波束与侧扫声呐数据融合

海底构筑物周围地形稳定性监测,通过多波束与侧扫声呐数据融合技术,可获取地形地貌信息,以及海床表面和浅地层的底质属性信息^[12-13]。即利用多波束水深地形测量获取海底地形图,通过插值方法生成高精度海底 DEM,利用两次监测得到的高精度 DEM 计算海底冲刷量;同时利用侧扫声呐扫描海底,获取海底地貌图,通过综合判定划分海底底质类型及其分布,基于两次实验结果数据,分析底质类型分布范围变化,最后基于冲刷量和底质类型变化趋势评估海底构筑物周围地形稳定性。

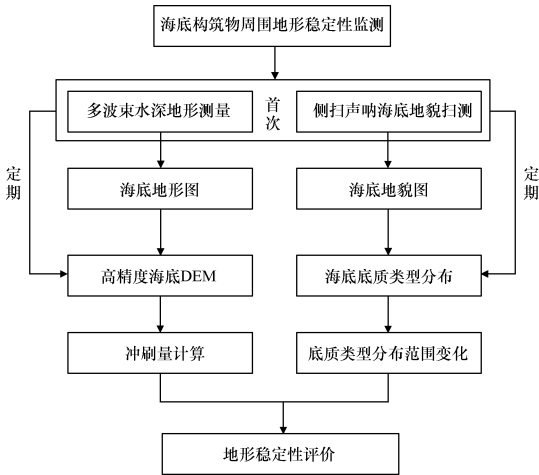


图 3 海底构筑物周围地形稳定性监测流程

4 结语

海上风电工程结构健康监测是一门综合性技术,涉及测绘学、海洋动力学、信息技术、多传感器技术、多源数据融合等多个学科与技术,长期以来都是学者研究的热点和电力管理部门关心的焦点,也是实际运维过程中面临的困境和亟须需解决的问题。我国安全监测研究尚处于起步阶段,离一些发达国家还有一定的差距。本研究应监测需求的现状,初步构建了海上风电工程水上、水下一体化安全监测体系框架,阐述了主要工作流程和关键技术,以期为海上风电工程结构设施管控、变化监控和防灾减灾提供新的应急方案和技术指导。

我国海洋事业正在蓬勃发展,在国家海洋发展战略和海上丝绸之路重大战略倡议的指导下,应不

断提升海洋工程安全监测能力,集成先进的传感器,借助稳定的通信技术实时监测其运维期间的结构状态响应,获得能够反映海洋环境以及结构状态的各种监测数据,对风机结构的稳定性与健康状态进行评估,为海上风电工程的维护和管理提供科学依据。

参考文献

[1] 彭潜.海上风电场风机基础不均匀沉降监测与分析[J].水电与新能源,2019,33(2):75—78.

[2] MÁRIO V,ELSA H,MIGUEL A,et al.Path discussion for offshore wind in Portugal up to 2030[J].Marine Policy,2018(100):122—131.

[3] CHEN J D,WANG J.Development status,trends and prospects of offshore wind power in some foreign countries[J].World Sci-Tech R&D,2014,36(4):458—464.

[4] 聂炳林.国内外水下检测与监测技术的新进展[J].中国海洋平台,2005,20(6):43—45.

[5] 盖会明.海洋平台结构健康监测方法研究[D].北京:北京化工大学,2006.

[6] 梁文彬.基于光纤光栅的船舶结构健康监测技术研究[D].天津:天津大学,2011.

[7] 杨元喜,徐天河,薛树强.我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J].测绘学报,2017,46(1):1—8.

[8] 李建成,姜卫平.长距离跨海高程基准传递方法的研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2001,26(6):514—517.

[9] 余建伟,刘守军.中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统[J].测绘通报,2013,7(1):119—120.

[10] 李洪生.水下摄像机标定技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.

[11] 汤兴黎.水下摄像机标定与测量算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.

[12] 阳凡林,刘经南,赵建虎.基于数据融合的侧扫声纳图像预处理[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(5):402—406.

[13] 赵建虎,欧阳永忠,王爱学.海底地形测量技术现状及发展趋势[J].测绘学报,2017,46(10):1786—1794.