

基于海上风电场构建海洋水文同步实时现场观测系统的思考

蔡树群^{1, 2, 5, 6}, 牛建伟¹, 何映晖¹, 陈学彬³, 张永康⁴, 许洁馨¹, 陈植武¹, 林世桢^{1, 5}, 谢皆烁¹

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

3. 仲恺农业工程学院城乡建设学院, 广东 广州 510225;

4. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006;

5. 中国科学院大学, 北京 100049;

6. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广东 广州 510301

摘要: 海上风电是一种清洁的可再生能源。本文简述了海上风电发展概况, 并介绍了广东省在南海北部建设海上风电场的进展, 同时描述了南海北部一些典型的海洋水动力过程及其现场观测研究存在的难题; 最后提出利用海上风电场构建海洋水文现场同步实时网络系统的观点, 指出利用这些长期定点的网络式观测数据对研究海洋中小尺度动力过程等的优势。希望能为促进海上风电与海洋科学研究的融合发展提供参考。

关键词: 海上风电; 现场观测; 海洋水文; 南海

中图分类号: P715 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2021)03-0096-07

A view on constructing synchronous real-time in-situ observational system of marine hydrology based on offshore wind power field

CAI Shuqun^{1, 2, 5, 6}, NIU Jianwei¹, HE Yinghui¹, CHEN Xuebin³, ZHANG Yongkang⁴, XU Jiexin¹, CHEN Zhiwu¹, LIN Shicheng^{1, 5}, XIE Jieshuo¹

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography of the South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

4. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

6. Institution of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: Offshore wind power is a clean renewable energy source. In this paper, the development history of offshore wind power is briefly reviewed, the current offshore wind power projects under construction in Guangdong Province in the northern South China Sea are introduced, and some typical marine hydrodynamic processes and their existing problems in in-situ observations are described. Finally, a view on constructing synchronous real-time in-situ observational system of marine

收稿日期: 2020-10-29; 修订日期: 2020-12-12。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41890851); 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDJ-SSW-DQC034); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)专项(GML2019ZD0304); 广东省自然资源厅专项([2020]017)

作者简介: 蔡树群(1968—), 男, 广东省汕头市人, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事海洋内波和环流研究。email: caisq@scsio.ac.cn

通信作者: 蔡树群。email: caisq@scsio.ac.cn

Received date: 2020-10-29; **Revised date:** 2020-12-12. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41890851); Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (QYZDJ-SSW-DQC034); Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0304); Special Project by Department of Natural Resources of Guangdong Province ([2020]017)

Corresponding author: CAI Shuqun. email: caisq@scsio.ac.cn

hydrology in the northern South China Sea based on the offshore wind power field is put forward, and the advantage of using these synchronous real-time network in-situ observational data on the study of oceanic meso- and small-scale dynamic processes is noted. This paper would be significant and valuable to the integrated development of offshore wind power and marine science study.

Key words: offshore wind power; in-situ observation; marine hydrology, South China Sea

风力发电是指利用大自然的风力推动风力发电装置以获取电能的方法。由于风能是一种清洁无公害、环保的可再生能源,且自然界的风能蕴量巨大,因此风力发电日益受到世界各国的重视。早在20世纪初,国外就已经开始了小规模陆上风电场的建设。近年来,随着对电能的巨大需求以及对海洋资源的开发利用,海上风电场的建设迅猛发展。

南海是位于东亚季风区的半封闭边缘海,深受季风的影响,冬季以东北季风为主、夏季则以西南季风占优,同时南海也是热带气旋/台风频繁过境的海域,风能资源丰富。此外,南海海盆底地形变化陡峭、礁盘星罗棋布,南海北部海域受西太平洋黑潮入侵的影响,水体层结显著,导致南海成为一个多尺度动力过程非常丰富的海区,除了常见的波浪、潮流、海流之外,还存在不同时空尺度的涡旋、内波、锋面、涡丝、湍流混合等从中尺度到小尺度的动力过程——对这些动力过程时空变化规律的认识不仅具有十分重要的物理海洋学理论研究意义,而且对于海上风电场建设的选址、海洋资源开发和海洋工程等都具有重要的参考价值。但是,这些中小尺度动力过程的研究严重依赖于现场观测数据的分析研究。几十年来,尽管国内外海洋科学家在南海进行过大量的科学考察实验,掌握了众多现场观测资料,但是由于南海海盆宽广、每次科考的研究目标各不相同等原因,历史现场观测资料的数量、时限和数据同步性存在很多缺陷,难以很好地把握南海中小尺度动力过程的生成和演变规律。

目前,已经有研究表明,海上风电场投入运行后,海上的风机桩基实际上可起到类似人工鱼礁聚集鱼类的作用,德国、韩国等国家都启动或探索海上风力发电与海水养殖的结合,我国山东省也在去年启动了国内首个“海上风电+海洋牧场”示范项目,提升海水养殖与海上风电融合发展。有鉴于此,本文提出了利用海上风电场构建海洋水文同步实时现场观测系统的观点,以促进海上风电与海洋水文科学研究的融合发展。

1 南海海上风电场建设的进展

1.1 海上风电概况

人类的发展离不开能源,寻求清洁环保、取之不尽的可再生能源一直是人们的梦想,而利用风能发电是可再生能源领域中技术最成熟、发展最快的清洁能源。1897年,著名的空气动力学鼻祖、丹麦的Poul la Cour通过风洞实验成功发明了风力发电机,随后陆上风电迅猛发展。随着科学技术的发展和海洋资源的开发,陆上风电场的成功经验开始往海上延伸。1991年,同样是丹麦独占鳌头,建成了全球首个海上风电场——Vindeby海上风电场。之后欧美、日本等各国的海上风电技术日臻发展。根据欧洲风能协会发布的欧洲海上风电报告表明(中国风能产业网,2020),2019年欧洲新增502台海上风力发电机组,涉及10个已成功并网的海上风电项目,新增装机容量共计3627MW,海上风电机组平均单机容量达7.8MW。相比之下,我国的陆上、海上风电技术相对发展落后,直到2010年,上海的东海大桥项目的投产才标志着我国海上风电实现零的突破。据报道,2019年,我国海上风电新增装机198万千瓦,累计装机593万千瓦(国家能源局,2020)。

海上风电场的选址十分重要,因为并不是所有的海区都适合建设海上风电。根据我国《海上风电开发建设管理办法》[2016]394号规定:海上风电场应当按照生态文明建设要求,统筹考虑开发强度和资源环境承载能力,原则上应在离岸距离不少于10km、滩涂宽度超过10km时海域水深不得少于10m的海域。除此之外,海上风电场选址最主要的考量是风力资源,一般要求海区的年平均风速大于 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;其次是海底的地质结构是否稳定(包括地震的活跃程度、底地形坡度、海床的冲淤变化程度等等)以及水动力环境(包括流场、波浪的强度)是否适宜;再者,还要考虑风电场的水深、离岸距离(这主要是出于工程投资成本和技术可行性的考量,初期的风电场场址的水深一般不超过20m,但由于科学技术的发展且远海风能资源更加稳定,欧洲海上风电正向远海深水区发展,水深和离岸距离逐步增加。2019年欧洲在建的海上风电场平均水深为33m、

平均距离为 59km, 其中水深最深的漂浮式项目 Hywind demo 风电场所在水深甚至可达几百米; Hornsea One 等风电场的离岸距离都超过 100km)及极端气象条件(例如台风、雷电天气等)对工程建设的影响;最后还要考虑与当地海洋功能区划及相关规划的符合性、保护海洋生态环境和敏感目标(包括鸟类、渔业资源等)避开海底管道和电缆、航道、锚地和其他重要设施,等等。

南海处于典型的季风盛行海区,风力资源十分丰富,北部有宽广的、底地形变化相对平缓且地质结构相对稳定的大陆架,海区水动力环境变化复杂

但各地差异较大,但总体来说,经论证遴选,仍不失为一个较好的海上风电场。

1.2 广东省的南海海上风电场概况

作为经济发达的大省,广东省自 2017 年起已经将海上风电定位为重点发展产业。按照 2018 年《广东省海上风电发展规划(2017—2030 年)(修编)》(广东省发展改革委, 2018), 广东省规划海上风电场址 23 个, 总装机容量达 6685 万千瓦。但是据目前不完全统计, 广东省经论证在建的海上风电项目已经达到 26 项(表 1), 主要分布在珠江口、南海北部近海附近的大陆架上。

表 1 广东省目前在建的南海海上风电项目

Tab. 1 Current offshore wind power projects under construction in Guangdong Province

序号	海域所属地级市	海上风电项目	项目数
1	珠海	珠海桂山, 珠海金湾, 珠海桂山二期	3
2	湛江	广东粤电湛江外罗, 广东粤电湛江外罗二期, 湛江徐闻, 广东粤电湛江新寮	4
3	阳江	中广核阳江南鹏岛, 三峡新能源阳江沙扒, 粤电阳江沙扒, 中节能阳江南鹏岛, 三峡新能源阳江沙扒二期, 三峡广东阳江阳江沙扒三、四、五期, 阳明阳江沙扒	7
4	汕尾	汕尾后湖, 中广核汕尾甲子一、二	2
5	汕头	华能汕头勒门(二), 汕头市南澳洋东, 大唐南澳勒门 I, 三峡汕头海门场址一, 华能汕头海门(场址二、三)	5
6	揭阳	国家电投揭阳神泉一, 国家电投揭阳神泉二, 国家电投揭阳靖海	3
7	惠州	中广核惠州港口一, 中广核惠州港口二 PA、PB	2

海上风电场主要由海上风电机组、海底电缆、升压站三部分构成, 它一般依据所在海域的地质环境、水动力和冲淤环境、用海原则及工程投资性价比等要素, 由若干台各自独立的风电机组按照不同的平面方案设计构成的阵列式风电机组, 每台风电机组发出的电能通过海底电缆接入升压站, 升压后再通过海底电缆输送到陆上集控中心并接入电网系统。其中, 每台风电机组作为一个独立的发电系统, 它是由海上风机、塔架和风机基础三部分构成的。目前, 根据风机基础的不同, 海上

风机主要分为固定式风机和漂浮式风机(樊天慧等, 2019)。其中, 固定式风机是将基座固定在海床上, 包括重力式基础、单桩基础、沉箱基础、多桩基础、导管架基础等各种类型的风机; 而漂浮式风机则是将风机建在浮动平台结构上, 由锚泊系统固定于海床, 包括由单个浮式立柱(Spar)式风机、由多个浮式立柱和斜撑连接的系泊系统组成的半潜式风机, 以及由多个垂直系泊的浮式立柱组成的张力腿(tension-leg platform, TLP)式风机等多种类型(图 1)。

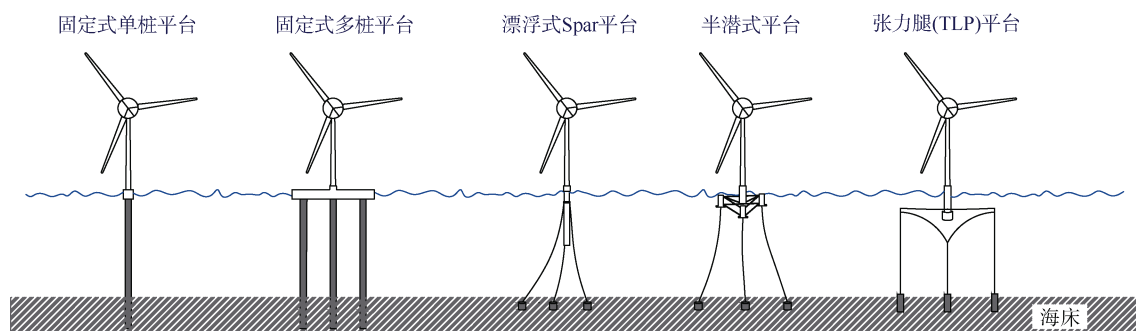


图 1 海上风电机组平台的 5 种常见形式

从左至右分别是固定式单桩基础、多桩基础、漂浮式 spar、半潜式和 TLP

Fig. 1 Five common forms of offshore wind power platforms. From left to right, they are fixed types including single pile and multi-piles, floating types including spar, semi-submersible platform, and Tension-Leg Platform, respectively

2 南海北部海洋水文动力现象及其现场观测存在的问题

2.1 南海北部海洋水文动力现象概况

海洋是一个包含大尺度(量级为 1000km)环流、中尺度(量级为 100km)涡旋/内波、次中尺度(量级为 1~10km)涡丝/锋面和小尺度(量级为 0.1~1cm)湍流混合等多尺度动力过程的复杂非线性系统(Skákala et al, 2019)。几乎所有海洋水文动力现象的发现都有赖于包含卫星遥感在内的海洋观测技术的快速发展和广泛应用。

南海北部是一个典型的具有多种时空尺度动力过程的海区。来自珠江口几大口门径流的冲淡水向南注入南海北部, 冲淡水羽状流受径流大小、潮流、风以及广东沿岸流的不同影响而形成离岸向外扩展、向西沿岸扩展、向东离岸扩展、东西沿岸对称扩展等多种不同形态分布(Ou et al, 2007; Chen et al, 2016)。一般认为, 冬季沿岸流向西, 夏季沿岸流向东(Su, 2004)。在广东沿岸流的外侧, 受东亚季风影响, 南海北部的陆坡的海流也呈现明显的季节性变化: 冬季以西南向海流为主、而夏季则以东北向海

流为主。在夏季, 由于受局地海底地形、岸线形状以及西南季风与珠江冲淡水联合效应共同作用, 粤东沿岸会出现上升流(Wang et al, 2014)。同时, 黑潮在流经吕宋海峡时, 其以不同方式、程度和强度入侵南海北部, 使得南海北部环流更为复杂。受风应力旋度、黑潮入侵和地形等因素的影响, 南海北部中尺度涡现象活跃、呈现复杂的多涡结构(He et al, 2018); 这些涡旋一旦形成, 一般以罗斯贝波的形式向西传播。此外, 来自西太平洋的潮波经过吕宋海峡传入南海时, 潮流在穿越吕宋海峡之间的岛屿和变化陡峭的海底双海脊过程中会形成振幅巨大的内潮及强非线性内孤立波(Cai et al, 2012)。除此之外, 由于南海又是受台风频繁过境影响的海区, 由此引起海表风场的突变会在海洋上混合层激发近惯性振荡, 随之引起密跃层附近水体的扰动而产生具有局地惯性频率的近惯性内波(Xu et al, 2019)。因此, 南海北部复杂的环流/涡旋/内波等多尺度动力过程及其非线性相互作用, 导致流场十分复杂, 水体混合强烈、垂向层结强度日变化乃至季节性变化显著; 而水体层结强度的变化又反过来影响内波的强度和垂向结构。

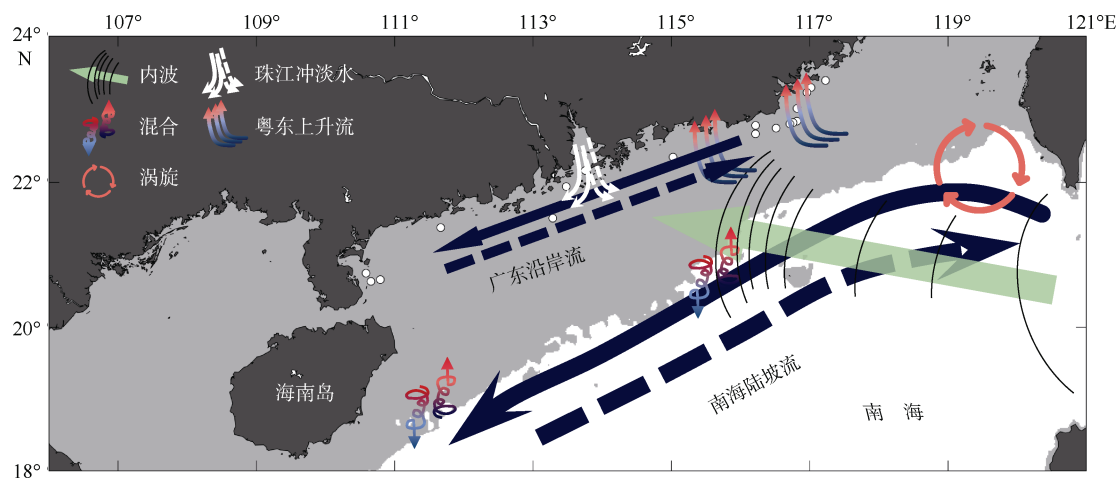


图2 南海北部海洋多尺度动力过程及广东海上风电场位置示意图

白色圆圈表示风电场所在大概位置, 实线箭头表示冬季的海流, 虚线箭头表示夏季的海流, 淡灰色区域表示水深浅于 200m 的海域[审图号为 GS(2016)1609 号]

Fig. 2 Diagram of oceanic multi-scale dynamic processes in the northern South China Sea and the locations of offshore wind power projects in Guangdong Province. The white dots denote the approximate sites of offshore wind power projects, the solid arrows denote the currents in winter whilst the dashed arrows denote the currents in summer, and the light grey area indicates that the water depth there is shallower than 200m

2.2 南海北部水文现场观测存在的问题

近年来海洋水文观测技术迅猛发展, 但仍然可以归纳为如下几个方面: (1)浮标和潜标技术, 包括集常用的气象水文传感器于一身、具备先进的数据采集和通信的全天候实时监测的定点观测浮标/潜

标, 以及漂流浮标 Argos 和 ARGO 探测浮标等; (2)依托沿岸或石油平台作为固定式的海洋观测平台的岸基台站观测技术, 也包括最近新发展的高频地波雷达观测技术; (3)利用船舶作活动平台进行海洋大面调查和观测的船基海洋观测技术; (4)利用航空遥感

和卫星遥感进行大尺度观测的海洋遥感技术; (5) 将自动监测系统布设于河口或近海海底的海床基观测技术; (6) 包括载人潜器、无人有缆遥控潜器和水下滑翔机等用于水下环境监测的自航式海洋观测平台技术(蔡树群 等, 2007)。

但是如上所述, 南海存在复杂的多空间、多时间尺度变化的动力现象, 针对不同动力现象开展现场观测所对应的时间和空间采样分辨率存在很大差异。例如, 利用声学多普勒流速仪来观测海流或内潮波, 采样的频率设计为每小时 1 次就足够了, 但如果用来观测内孤立波, 采用的频率则最好不超过每两分钟 1 次。这是由它们之间迥异的时间尺度决定的。此外, 每种海洋观测技术手段都有其缺陷, 例如浮标和潜标技术、海床基观测技术以及自航式海洋观测平台技术都存在致命的电源供应难题; 岸基台站观测技术只能观测近岸的环境要素; 船基海洋观测技术只能观测到有限的点、面或层次的环境要素, 且受制于台风等灾害性天气/海况的影响; 海洋遥感技术可以进行大尺度、快速、同步地观测, 特别是最近美国国家航空航天局和法国国家空间研究中心计划于 2021 年发射升空新的传感器计划 Surface Water and Ocean Topography, 其对高程测量的精度可达到 0(1)km, 这非常有助于观测中小尺度动力过程, 但是遥感观测也只能获取某些时刻海表上层的一些海面高度、海流、温度或大振幅内波的信息。

因此, 尽管之前对南海北部多尺度动力过程的研究取得了不少成果, 特别是对大中尺度的海流、涡旋的生成和演变规律有较为清晰的了解, 但是对一些中小尺度动力过程的研究仍然处于初始阶段, 这主要在于我们无法获得阵列式、长期(持续一年以上)定点连续的现场观测资料, 导致对一些海洋中小尺度动力过程的研究无法获取突破性的进展。而要获得这些资料, 利用浮标、潜标或海床基观测技术是首选的手段, 但如何保证其电源的持续供应是一个难题。近几年来, 我国海洋科学家已经在黄海、东海、南海和西沙等 4 个观测研究站建成中国近海海洋科学观测研究网络多学科观测系统, 观测研究站主要由观测浮标系统、组合潜标系统、自动气象站、岛礁外缘水位计、岛上自动气象站、岛上实验室、岛屿外缘坐底式观单元、上层和深层海洋环境观测单元以及多学科观测单元组成。但是, 这些观测系统的观测站点所涵盖的海域仍然非常有限, 同时除了需要解决陆上电源的供应外, 布放离岸的浮标、潜标还要避免受人力的破坏或者过往船只的磕

碰, 特别是对于潜标, 为了避免被渔民的渔网缠住, 一般要将设置在最上面的观测仪器离海面 50m 左右, 即做成一个不露出海面的潜标观测系统, 但这样的后果是无法观测到海面 50m 以浅的观测数据, 这无疑极大地影响对海洋中小尺度动力过程的信息提取和现象解读。

对于南海北部的在建风电场, 每个工程项目的场址涉海面积一般在几十至 100km² 以内、至少包含几十台乃至上百台风电机组, 每台风电机组之间的桩柱距离约几十米; 如果依托每台风机基础配置水文传感器、数据采集和通信的全天候实时监测系统, 那么每台风机基础就是一个定点的观测浮标/潜标; 在保证电源持续供应的情况下, 每个风电场就是一个阵列式的、长期(持续一年以上)定点连续的现场观测平台(图 3)。相比依托漂浮式风机基础的监测系

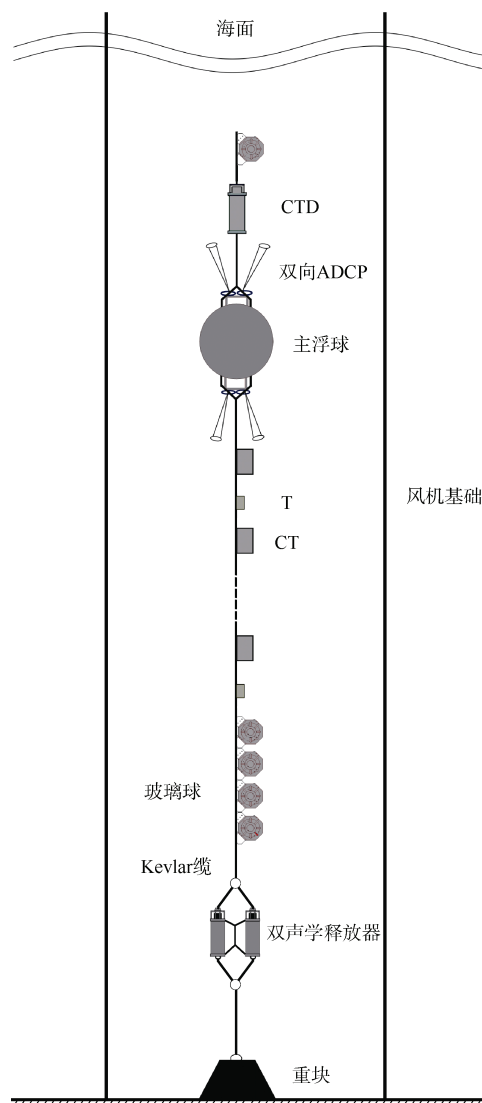


图 3 附着在固定式风机基础上的观测潜标的侧面投影图
Fig. 3 Profile of the observational mooring attached at the base of offshore wind power

统, 依托固定式风机基础的监测系统能够避免因海流、波浪等引起观测仪器摇曳, 进而导致测量误差。不过, 无论是以固定式风机为基础的监测系统, 还是依托漂浮式风机的监测系统, 都需要至少能保证其电源的长期持续供应, 并更好地避免受人为破坏, 从而持续观测到从海面至海底全水深的现场数据; 同时依托风机露出水面的部分来安装先进的数据采集和通讯系统, 就可以实现水下环境参数的观测和数据的实时传输, 形成一个依托风电场风机基础的海洋水文同步实时现场观测系统。这对于研究海洋中小尺度动力过程的科学家无疑是一大福音。

3 利用海上风电场构建海洋水文同步实时现场观测系统的思考

综上所述, 如果能够利用目前海上风电场的大批量建设, 构建一个依托风电场风机基础的海洋水文同步实时现场观测系统, 除了可以取得一大批量的长期定点、同步的现场观测数据之外, 至少还可以在下述几个方面的海洋科学研究热点问题取得突破性的研究成果。

1) 珠江口冲淡水羽状流的扩散范围。由于冲淡水在向外海流动过程中不断地与南海咸水混合, 其扩散范围深受径流、潮流、风以及广东沿岸流的影响, 仅凭有限的浮标/潜标或大面站现场观测数据、有限时段的遥感图片及数值模拟结果来研究, 无法透彻地揭示珠江口冲淡水羽状流的向粤东或粤西扩展的长期、连续变化趋势。倘若能够利用伶仃洋、粤东和粤西现有的风电场, 建设依托风机基础的海流、温盐等的同步实时网络监测系统, 上述难题将迎刃而解。

2) 内孤立波在粤东陆架陆坡区的破碎、失稳和能量转换。源自吕宋海峡并向东经过东沙群岛的内孤立波在传播至南海粤东陆坡区时, 由于层结强度减弱、底地形变化等原因会发生形态变化、失稳、破碎等现象, 这些现象是如何发生的? 发生的具体地点在哪里? 其失稳、破碎后的能量以何种形式耗散或转换? 通过依托风机基础的海流、温盐的同步实时网络监测系统, 我们可以获得大量长期定点、同步的现场观测数据, 从而揭示这些动力过程和规律。

3) 南海北部沿岸的风暴潮增水。以往关于南海北部沿岸风暴潮增水特征和规律的研究大都是依据个别沿岸观测站的资料并结合数值模式。但由于潮波、波浪在传播靠近沿岸时会发生折射、反射等现象, 使得对风暴潮增水的研究更加复杂。借助在相

对开阔的陆架海域依托风机建立的海流、温盐、波浪、水位等同步实时现场观测系统, 可以对风暴潮增水进行现场观测, 从而获得未受折射、反射影响的近海风暴潮增水规律, 之后再结合沿岸观测站的风暴潮增水实测数据和数值模式的研究, 有望充分揭示风暴潮增水在近海、沿岸的特征和演变规律。

4) 小尺度多联通区域的波浪-海流相互作用。海上石油平台桩柱间的波浪-海流相互作用及其载荷一直是海洋科学和海洋工程中面临的难点话题, 以往的研究大多借助室内实验室的物模试验数据, 结合数值模拟的方法, 但其结论缺乏足够多的海上现场观测数据的验证。在开阔海域中, 风电场有序排列的固定式风机基础(桩柱)恰好形成一个小尺度多联通区域的波浪-海流相互作用的天然平台。如果能借助这些平台的海流、波浪、水位等同步实时现场观测系统进行现场观测, 就可以结合数值模式来揭示平台桩柱间的波浪折射、衍射和反射规律, 以及波浪-海流相互作用的规律及其对平台的载荷。

5) 海洋动力-生物地球化学过程的耦合交叉研究。海洋动力过程对营养盐和浮游生物的水平 and 垂直分布有重要影响。作为延伸, 如果在依托风机基础的海洋水文同步实时现场观测系统中增加对营养盐、浮游动植物的同步观测, 不仅有利于研究海洋动力过程对浮游动植物、营养盐的影响和调制作用, 强化海洋动力-生物地球化学过程的耦合交叉研究, 还可以为海洋生态动力学模式的参数化方案的优化和改进提供大量的观测数据和基础积累, 促进海洋生态动力学的学科发展。

诚然, 利用海上风电场构建海洋水文同步实时现场观测系统时也可能存在以下问题或风险。

1) 观测系统的构建必须实现征得风电场企业业主的同意, 需争取获得国家层面的政策支持或双方合作申请“产学研”相关项目, 在互惠互利的基础进行协商以达到双赢。同时, 由于每个观测系统一般只包含缆绳、海流、温盐等传感器, 体积小, 不会对风电场的申请用海面积或权属造成影响, 但在风电场的工程设计和建设时需进行综合考虑和论证, 以便观测系统得以合理安装。

2) 由于风机水下结构和观测系统长期置于海底, 为了避免海洋生物的附着对仪器观测数据精度的影响, 建议对风机和观测系统进行定期同步维护。

3) 万一由于风太小或台风期间风机停转等原因导致风电供应电力不足, 观测系统的电力可以通过观测仪器自行携带的电池进行供电, 保证观测系统的正常运行。

参考文献 References

- 蔡树群, 张文静, 王盛安, 2007. 海洋环境观测技术研究进展[J]. 热带海洋学报, 26(3): 76–81. CAI SHUQUN, ZHANG WENJING, WANG SHENG'AN, 2007. An advance in marine environment observation technology[J]. Journal of Tropical Oceanography, 26(3): 76–81 (in Chinese with English abstract).
- 广东省发展改革委, 2018. 广东省海上风电发展规划(2017-2030年)(修编)[R/OL]. (2020-04-11) [2020-10-29]. http://drc.gd.gov.cn/gkmlpt/content/1/1060/post_1060661.html#876
- 樊天慧, 陈超核, 2019. 海上风电的发展与挑战[J]. 广东造船, 38(5): 13–15.
- 国家能源局, 2020. 国家能源局 2020 年一季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2020-03-06). [2020-10-29]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm
- 中国风能产业网, 2020. 2019 年欧洲海上风电报告[EB/OL]. (2020-02-10). [2020-10-29]. <http://www.cweea.com.cn/xysj/html/29736.html>
- CAI SHUQUN, XIE JIESHUO, HE JIANLING, 2012. An overview of internal solitary waves in the South China Sea[J]. Surveys in Geophysics, 33(5): 927–943.
- CHEN ZHAOYUN, PAN JIAYI, JIANG YUWU, 2016. Role of pulsed winds on detachment of low salinity water from the Pearl River Plume: upwelling and mixing processes[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(4): 2769–2788.
- HE QINGYOU, ZHAN HAIGANG, CAI SHUQUN, et al, 2018. A new assessment of mesoscale eddies in the South China Sea: surface features, three-dimensional structures, and thermohaline transports[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123(7): 4906–4929.
- OU SUYING, ZHANG HONG, WANG DONGXIAO, et al, 2007. Horizontal characteristics of buoyant plume off the pearl river estuary during summer[J]. Journal of Coastal Research, Special Issue 50: 652–657.
- SKÁKALA J, SMYTH T J, TORRES R, et al, 2019. SST Dynamics at different scales: evaluating the oceanographic model resolution skill to represent SST processes in the Southern Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(4): 2546–2570.
- SU JILAN, 2004. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 24(16): 1745–1760.
- WANG DONGXIAO, SHU YEQIANG, XUE HUIJIE, et al, 2014. Relative contributions of local wind and topography to the coastal upwelling intensity in the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(4): 2550–2567.
- XU JIEXIN, HUANG YANDAN, CHEN ZHIWU, et al, 2019. Horizontal variations of typhoon-forced near-inertial oscillations in the south China sea simulated by a numerical model[J]. Continental Shelf Research, 180: 24–34.