

# 海上风电场维护管理技术研究现状与展望

刘永前, 马远驰, 陶涛

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Review on Maintenance Management Technology for Offshore Wind Farms

LIU Yongqian, MA Yuanchi, TAO Tao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The operation and maintenance cost accounts for more than 20% of the lifecycle cost in an offshore wind farm, and minimizing this cost is the primary measure to increase the overall benefits of the wind farm. Therefore, exploring efficient operation and maintenance management technologies is an urgent needed research topic for large-scale development of offshore wind power. In this paper, 3 important fields for offshore wind power maintenance management technologies (i.e., maintenance strategy, operation and maintenance path optimization, and maintenance scheduling) are reviewed. Aiming at current research gaps (e.g., lack of advanced maintenance strategy, lack of path optimization tools and lack of high fidelity maintenance scheduling model), future research trends of offshore wind power maintenance management technologies are prospected: component-specific maintenance strategies will be developed for different wind turbine components to minimize the cost of integrated operation and maintenance; largescale operation and maintenance bases will be developed to provide maintenance services for largescale offshore wind farm cluster; higher fidelity maintenance scheduling models for offshore wind farms will be developed; by integrating the artificial intelligence, internet of things and big data technologies, intelligent operation and maintenance technologies will be developed and applied in offshore wind farms.

**Keywords:** offshore wind farms; maintenance strategy; access path optimization; maintenance scheduling

**摘要:** 海上风电的运维成本占项目总成本的20%以上, 控制运维成本的能力已经成为决定风电场运营效益的关键。探索高效、可行的运维管理技术, 是大规模开发海上风电急需研究的课题。针对海上风电场维护管理技术中3个重要研究领域, 即海上风电场维护策略、运维路径优化和维护调度决策的研究现状进行了系统综述。针对目前存在的维护策略相对单一、路径优化求解困难以及维护调度决策模型过于理想

等问题, 提出了未来海上风电维护管理技术的研究趋势: 机组不同部件将采用不同维护策略以最小化综合运维成本; 海上风电维护模式将朝着运维基地服务风场集群的方向发展; 海上风电调度决策模型将采用更加精细化建模方法来满足海上风电的实际需求; 结合人工智能、物联网和大数据技术的智能化运维管理技术将成为必然趋势。

**关键词:** 海上风电场; 维护策略; 运维路径优化; 维护调度

## 0 引言

风力发电在应对气候变化、环境保护、能源转型等方面可以发挥不可替代的作用<sup>[1]</sup>。最近几年陆上风电技术与商业开发日趋完善, 而海上风电正在成为全球风电行业新的增长点<sup>[2-4]</sup>。根据全球风能理事会以及欧洲风能理事会发布的最新数据, 2017年全球海上风电新增装机容量4334 MW, 较2016年同期增长87%, 全球海上风电累计装机容量达18814 MW, 较2016年同期增长30%。与欧洲发达国家相比, 虽然中国海上风电起步较晚, 但其正逐步成为中国东部沿海地区风力发电的主要发展方向, 也是未来要攀登的风电技术制高点。

海上风电具有风能资源丰富、对环境的负面影响小、易于规模化开发等优点<sup>[5-11]</sup>。另外, 海上风电场一般靠近电力负荷中心, 电网消纳问题易于解决, 很大程度上减少了长距离输电问题。海上风电的诸多优点使其具有巨大的发展前景, 很多国家正在加速促进海上风电的发展<sup>[12-13]</sup>。然而, 由于长期运行在恶劣的天气条件和复杂的地理环境中, 海上风电机组可靠性低、维护成本高<sup>[14-16]</sup>, 海上风电的运维成本约占

项目全生命周期总成本的20%~30%<sup>[17-18]</sup>,是陆上风电运维成本的2~3倍<sup>[19]</sup>。海上风电运维对风电场运营经济性造成巨大挑战,已逐渐成为影响海上风电发展的主要因素之一<sup>[20-21]</sup>。影响海上风电运维成本的因素众多,从全生命周期成本管理角度来考虑,海上风电场的设计和开发阶段直接决定设备的可靠性,对全生命周期成本的影响是最大的,因而风电机组的选型将很大程度上决定风电场的运维成本。对于已经建成的海上风电场,维修人员的可用性、备品备件和船只的可用性、天气条件、维修策略以及船舶租赁、工人和备件成本等均会影响海上风电的维护安排和费用<sup>[22-23]</sup>。通过优化运维策略和调度决策,结合先进运维技术(如状态监测、故障诊断和故障预测等),构建合理的运维体系,可以有效降低海上风电场的运维成本。本文重点聚焦海上风电场维护管理技术。

本文将分别从海上风电维护策略、海上风电维护路径优化和海上风电维护调度决策模型3个方面对近期的研究进行归纳,总结目前海上风电维护管理技术领域存在的问题,并提出未来的研究趋势及发展方向。

## 1 海上风电场维护面临的挑战

尽管海上风电装机容量增长迅速,但维护难度大、费用高等特点使得海上风电度电成本远高于陆上风电<sup>[6]</sup>,这使海上风电场的盈利状况受到极大的影响。海上风电场的特殊地理位置及环境状况,使海上风电面临巨大的挑战,体现在以下3个方面。

### 1.1 海上风电机组故障率更高

海上风电场的平均风速大、年利用小时数高,但同时海上风电场设备更易受到盐雾、台风、海浪、雷电、冰载荷等恶劣自然条件影响<sup>[24]</sup>,风电机组部件失效快,部件的使用寿命缩短<sup>[13,25]</sup>。另外海上风电场离岸较远,不便于频繁的日常巡视,因此,海上风电机组设备故障率显著高于陆上风电。据统计,海上风电机组的年平均可用率只有70%~90%,远远低于陆上风电机组95%~99%的可用率<sup>[26-27]</sup>。

### 1.2 海上风电机组可达性差

海上风电场大多地处海洋性气候和大陆性气候交替影响的区域,这些区域天气及海浪变化较大。由于海上运输设备(如运维船、直升机等)受天气影响很大,当浪高或者风速超过运输设备的安全阈值时,出

于安全考虑运维技术人员不能登陆风电机组进行维护。能够在海上进行风电机组维护作业的时间较短且具有随机性<sup>[28]</sup>。据统计,以现有的技术水平每年能够接近海上风电机组的时间只有200天左右,并会随着海况条件的恶化而减少<sup>[7]</sup>。

### 1.3 海上风电场运行维护费用更高

海上风电场维护需要租赁或购买专用的运输船、吊装船和直升机等,因此,零部件的运输和吊装成本远高于陆上风电<sup>[29]</sup>。另外,海上风电机组的维护受限于海况条件,往往不能对风电机组进行及时有效的维护,从而造成一定电量损失,间接增加了海上风电场的运维成本<sup>[17,30]</sup>。

海上风电场的维护工作面临着完全不同于陆上风电场的挑战,如果完全照搬陆上风电场的维护方式,将会出现很大的不适应性。现有的相关研究主要是为了克服海上风电维护面临的故障率高、可达性差和成本高这三大挑战而展开的。

## 2 海上风电维护策略

海上风电场维护成本不仅包括运行维护产生的人工费用、维修费用和备品备件等费用,还包括机组停机造成的电能损失<sup>[31-32]</sup>。因此,研究海上风电的维护策略对保证风电场经济性与可靠性至关重要。风电场维护策略分类方式很多,根据欧洲标准化协会规定,风电机组的维护可以分为事后维护、计划维护、状态维护3类<sup>[10]</sup>。目前,国内外针对海上风电维护策略的研究较多,研究趋势及方向如图1所示,归纳如下。

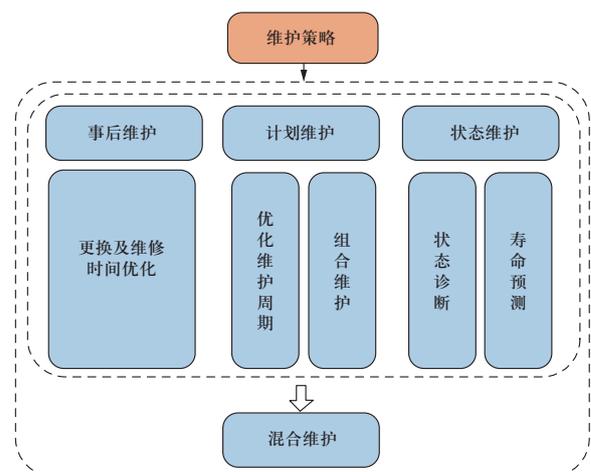


图1 海上风电场维护策略研究

Fig. 1 Research on offshore wind farms maintenance strategy

## 2.1 事后维护策略

事后维护是指设备发生故障前，不对其进行预防性维护，直至设备发生故障后再安排相关人员进入海上进行维护<sup>[33]</sup>。由于故障的发生具有随机性，与陆上相比，海上风电机组面临恶劣的自然环境、复杂的地理位置和困难的交通运输条件。在海上天气情况恶劣的时候，维修人员难以接近，若无法及时维修，将导致停机时间更长，则发电量损失巨大。因此对于海上风电而言，事后维护策略只适用于重要程度低、维护成本低的部件。与计划维护和状态维护相比，事后维护可以降低对机组维护及检查的频率<sup>[34]</sup>，能够在一定程度上节省海上运输费用。对于海上风电场而言，事后维护需要更长的维修时间、更多的维护资源并导致更长时间的故障停机。据统计，现有海上风电场的事后维护费用占总运维成本的65%~75%。综上，海上风电事后维护策略虽然能在一定程度上节省运输费用，但会导致更高的电能损失，经济性远低于其他类型的维护策略。

## 2.2 计划维护策略

计划维护是指在对设备的故障规律有一定认识的基础上，无论设备的状态如何，按照预先规定的时间对其进行维护的方式。计划维护主要分为日常巡检和特殊巡检。海上风电场设备日常巡检主要对风电机组、水面以上风电机组基础、海上升压站设备、风电场侧风装置、升压变电站、场内高压配电线路进行巡回检查；特殊巡检是针对发生风暴潮、台风、海上水文气象异常等情况，或风电机组、海上升压站非正常运行，或风电机组进行过事故抢修（或大修），或新设备（技术改造）投入运行后，增加的特殊巡回检查内容。海上风电计划维护策略相关的研究主要包括计划维护策略优化和基于计划维护策略的组合维护两方面。

计划维护策略的优化研究，主要集中在优化计划维护周期。计划维护周期选择不恰当，会出现过度维护或维护不足的现象，造成维护成本过高或可靠性过低的后果。文献[35]根据不同风电场的机组故障率和维护成本制定适合于每个风电场的维护计划，其中机组故障率通过海上风电机组的技术参数与海上风电场所处地区的天气状况进行预测，每个风电场有不同的维护间隔，能够很大程度上提升维护经济性。目前，对于已经投运的海上风电场，通常固定采用每年一到

两次的维护周期。但实际根据故障统计数据，机组的故障率在全生命周期内呈浴盆曲线，即初期、晚期故障率高，中期故障率低，在全生命周期内采用固定的维护间隔往往维护经济性较差，应对处于不同阶段的机组采取不同的维护间隔。文献[36]结合海上风电机组全生命周期内的失效曲线，将机组维护分为多个阶段，提出了海上风电机组分阶段计划维护策略，对于处于不同运行阶段的机组实行不同的维护频率。研究结果表明，分阶段计划维护策略与传统维护策略相比能够减少维护次数，在一定程度上降低维护成本。

组合维护策略是一种对计划维护策略的扩展。海上风电场在进行维护时需要租赁直升机或运维船，目前中国小型维护船的年租赁费用约为200万元，大型起重船的出海成本更高。据统计，运输设备的租赁费用约占总运维成本的近70%<sup>[37]</sup>。通常情况下，对各部件进行单独维护可能需要耗费更多的运输成本<sup>[38]</sup>。据统计，对于一个拥有100台风机的海上风电场，即使风电机组的可利用率高达97%，所有风电机组全部正常工作的概率仅为15%，一年中只有18天无故障运行<sup>[37]</sup>。为降低成本，近期部分学者提出了组合维护方法，即在对某一部件进行维护时，对其他还未达到维护期的部件提前进行维护。文献[35]提出了针对机组上多个部件的组合维护优化算法，该算法能够快速找出可以使总运维费用最小的机组各部件维护组合方式。文献[37]考虑海上风电场的特殊性，采用蒙特卡洛流程仿真方法，建立了海上风电场组合维护模型，该组合模型主要面向高故障率、低耗时的小型故障，实例分析显示该方法可降低维护运输成本5%以上。

除了对计划维护时间间隔的优化及组合维护的研究，还有文献进行了以下方面的研究。文献[18]在考虑运维经济性和机组可靠性的条件下，定义了维护优先数，并采用数据包络分析方法进行求解，以确定机组各部件的计划维护方式及先后顺序。算例结果显示对于多风电机组的风电场而言，分级优化可以大大节省维护时间。天气因素对海上风电机组维护的可达性产生很大的影响。文献[39]考虑了天气、季节因素对风电机组可达性产生的影响，构建了机会模型以对不同的天气指定不同的计划维护策略。算例结果表明，考虑天气的计划维护策略能够显著降低运维成本。

计划维护是目前海上风电最经济可行的维护方式，也是目前海上风电场所采用的最主要的维护策略。

## 2.3 状态维护策略

状态维护策略是预防性维护的一种,是指在海上风电设备中安装各种传感器,采集机组当前的运行状态数据,并且评估机组状态,在机组的状态评估和健康预测的基础上,确定机组的维护时机和维护内容。状态维护是通过机组状态监测过程中的状态信息对机组运行状态进行判断,以便及时发现故障并迅速制定正确有效的维护方案<sup>[40-41]</sup>。状态维护使风电设备的维修管理从计划性维修、事后维修逐步过渡到以状态监测为基础的预防性维修。状态维护过程示意图如图2所示。状态维护能够在最大限度保证机组可靠性的同时减少不必要的维护操作和停机时间,在一定程度上能够降低维护成本<sup>[42-43]</sup>。

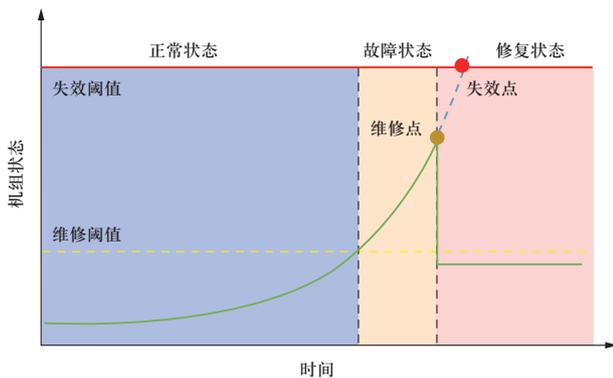


Fig. 2 Condition based maintenance diagram

实现状态维护的核心是风电机组及核心零部件的状态监测与故障诊断技术<sup>[44]</sup>。状态监测与故障诊断技术适用于风电机组齿轮箱、主轴、发电机和叶片等具有退化失效过程的关键部件。研究者针对风电机组做了大量关于状态监测与故障诊断的研究和探索,目前风电机组的状态监测与故障诊断技术已经取得了大量的研究成果。针对不同的监测信号,发展了不同的故障诊断技术,可监测的信号包括:振动信号、声学信号、电信号、温度信号以及油液成分等<sup>[45]</sup>。海上风电机组安装了各类传感器,可以测得大量的状态数据。但由于风速的随机波动特性,和变速型风电机组自身的特性,风电机组往往运行在多种工况下,加上设备运行状况本身也比较复杂,采集到的信号往往表现出较强的非平稳性和非线性,有时还具有较低的信噪比。如何处理和分析这些信号,是当前风电机组状态监测与故障诊断的关键难题<sup>[21]</sup>。

文献[46]综述了包括海上风电在内的多种海洋可再生能源系统采用的状态维护方法。由于海上风电场维护管理的特殊性,状态维护是海上风电场运维管理最理想的方式<sup>[11]</sup>。但是,状态维护需要复杂且昂贵的状态监测设备及系统<sup>[47]</sup>,出于成本考量,目前已投运的海上风电场采用状态维护方式的还比较少。海上风电场对机组的可靠性要求很高,状态维护策略能够满足海上风电场对可靠性的迫切需求。随着技术的进步与发展,状态监测系统的成本将持续降低,海上风电状态维护策略的研究成果对未来的海上风电运维发展至关重要。

对海上风电机组的运行状态进行实时监测、状态评估是进行维护的前提<sup>[48]</sup>。海上风电场条件恶劣,且离岸距离远,维护人员不能及时到达机组进行检查,所以海上风电机组对于状态监测的准确性及监测范围的需求远高于陆上风电。陆上风电机组状态监测系统的研究较早,目前已经趋于成熟。中国海上风电状态监测发展较晚,现有研究归纳分析如下:为适应海上风电场环境的特殊性,文献[49]提出了基于B/S模式的大型海上风电机组监测平台研究,以达到远程监测设备运行状态、诊断风电机组故障、查看历史运行数据、预测监测参数的短期变化,从而将损失降到最低,但是该方法仍欠缺高效准确定位故障位置的能力。为提高故障定位的能力,文献[50]构建了基于ZigBee的海上风电状态监测系统,考虑到传感器之间的相互影响,在风电机组的各关键部件安装无线传感器,包括速度传感器、温度传感器、振动传感器,实时全方位采集风电机组运行的数据,可以实现对故障的准确定位。文献[51]提出一种基于可靠性的维护策略模型,建立了动态降级模型,该模型通过状态监测的输入进行更新,然后估计不同维护操作下的结果。基于状态数据对机组状态进行诊断,能够及时发现风电机组及大部件的早期缺陷或故障。文献[52]构建了基于状态维护的海上风电机组维护决策模型,根据机组的状态监测数据,使用马尔科夫状态转移方程对风电机组状态进行预测,对性能退化程度不同的机组采取不同程度的维护方式。对于状态维护而言,维护阈值的选择对维护费用会产生较大的影响。

当机组或部件发生早期故障后,预测设备剩余寿命对海上风电运维具有重要指导意义。基于状态监测对机组或部件进行寿命预测,能够提前安排机组维护方案,调配维护资源,以避免设备发生失效造成损失。文献[53]基于状态维护策略,建立优化模型利用

状态监测数据确定海上风电机组叶片更换的预警阈值及计划维护的最佳更换时间。该研究能够准确预测叶片更换时间，保证叶片可靠性的同时减少停机时间。但是，该研究只针对机组叶片，缺乏对其他部件或整个系统的最佳维护阈值的研究。在此基础上，文献[20]基于状态监测信息利用神经网络模型预测机组各部件的剩余寿命，并根据故障概率安排机组设备的维护计划，算例证明该方法效果显著。

## 2.4 混合维护策略

每种维护策略适用于特定的零部件，单一的维护策略无法满足风电机组整体运维费用最低的需求。目前，大量研究开始采用多种维护策略相结合的方式，以使得总运维费用最低。文献[24]提出了考虑可达性的海上风电机组综合维护策略。作者综合运用状态维护和计划维护策略，优化机组部件的计划维护更换周期和不完全维护的时间间隔。文献[54]考虑了维护过程中的可达性约束条件，提出了将事后维护和计划维护结合的维护策略，并采用蒙特卡洛方法模拟各部件的随机故障，选择合适的计划维护周期。类似的，文献[55]基于事后维护和计划维护建立了考虑机组各部件寿命的维护决策模型，并求解使得总运维成本最小的最佳维护时间。对于在最佳维护时间内发生故障的机组采用事后维护，对于在最佳维护时间之前未发生故障的机组采用计划维护。

针对不同的海上风电设备选择不同的维护策略，在满足机组的可靠性要求的情况下，最小化风电场综合运维成本是未来混合维护策略研究的方向。

## 3 海上风电维护路径优化

在海上风电维护过程中，选定了合适的维护策略以后，如何选择最优运维路径是海上风电维护管理中面临的另外一个重要的问题。

降低海上风电运维成本的一个潜在领域是海上维修物流<sup>[56]</sup>。通过运维船或直升机将技术人员、设备、备品备件等运输到风电机组是一个重大挑战<sup>[57]</sup>。海上运输设备的租赁及使用费用昂贵，在运维费用支出中占很大的比重<sup>[58-59]</sup>。运维船的路径规划是一个复杂的多约束组合优化问题。目前针对海上风电路径优化的研究可以分为单风电场的路径优化及风电场群的路径优化。

## 3.1 单风电场的路径优化

文献[60]首次引入了海上风电场运维船的路径规划与调度问题，研究的目的在于找出运维船的优化路线与调度方案。该研究构建了维护路径与调度的数学模型，并通过模型求解出了以运维船成本及电能损失最小为目标的最优解，同时给出了每艘运维船几天内的详细路线与调度方案。该方法能够充分利用运维船，减少运输费用，但是该研究提出的模型求解困难、计算速度慢，只适合于简单的小型风电场。文献[61]为解决运维船的路径优化与调度问题提出了电弧模型和路径流量模型，首先对电弧模型使用Dantzig-Wolfe分解进行重构得到路径流量模型，然后使用了高效的启发式算法求解路径流量模型，使得运维船的路径与调度问题的计算量大大降低，能够适用于运维情况复杂的大型海上风电场。文献[62]同时也提出一种聚类匹配算法，能够以更快的速度解决多台风电机组的路径优化问题。

## 3.2 风电场群的路径优化

上述研究都只考虑了单运维基地-单风电场的运维船路径优化与调度问题，并没有考虑运维服务提供商可以使用多个港口作为运维基地为多个海上风电场提供运维支持的情况。随着越来越多邻近风电场的集群开发，考虑多运维基地-多风电场的运维船路径优化与调度愈发重要<sup>[63]</sup>。为解决这个问题，文献[10]以多运维基地-多风电场的运维路径优化与调度为背景，提出了基于Dantzig-Wolfe分解方法的算法，对风电机组进行混合整数线性规划求解，以生成每个周期内所有可行的路线以及运维船调度方案，然后利用整数线性规划模型找出能够最小化运维成本的最佳路径与调度方案。未来的海上风电发展将会朝着远海化发展，存在运输续航能力以及成本的限制，目前用母船携带子船到达离岸较远的风电场，再由子船在风电场内执行维护活动的方式。文献[64]考虑远海风电场运维时子母船结合的方式，同时对大型维护任务分班次进行或留在海上直至任务结束两种模式分别进行模拟，并准确计算各种模式的停机时间。该研究显示这种方式能够在一定程度上为降低大型远海风电场的运维成本提供方案。

## 4 海上风电维护调度决策

海上风电路径规划是海上维护管理的重要技术环

节,而海上运维调度决策是路径规划能顺利开展的前提条件。海上维护调度决策的目标是维护所涉及的生产管理、运行管理、设备管理和安全管理等环节产生的各类信息,并结合天气环境信息,对维修人员、备品备件以及运维船等维护资源进行快速合理调配。海上风电维护调度决策是海上风电场日常工作的重要内容之一,是确保风电场维护工作高效开展的基本要素。

不同于陆上风电场,海上风电场运维受环境影响很大,能否进行海上风电维护主要取决于天气状况<sup>[32]</sup>,当浪高或风速超出运输设备的限制时将不能接近风电机组进行维护<sup>[7]</sup>。风电机组维护调度是指在合适的时间窗内对维修所需的各种资源进行调度和分配,以保证维护的高效顺利开展,同时需要考虑电量损失成本和运维成本的平衡(如图3所示),从而提高海上风电场的运维效率同时使运维总成本最低、系统可靠性高<sup>[11,45,62]</sup>。当制定海上风电运维计划时,需要考虑很多因素,包括:天气状况、维修资源(如技术人员、运维船和备品备件)是否可用、机组停机造成的损失等<sup>[23]</sup>。目前有关维护调度策略的研究主要分为:维护调度模型建立及优化、维护调度计算速度提升、维护调度系统及工具开发。

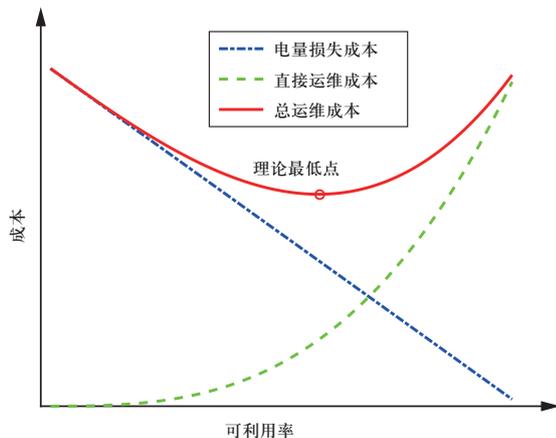


图3 电量损失成本和运维成本的平衡

Fig. 3 Balance of loss cost and maintenance cost

#### 4.1 模型的建立及优化

为减少维护时的运输费用和降低机组停机损失,文献[65]建立了一种混合整数规划维护调度模型,并给出初步结果。文献[5]提出了整数线性优化模型以在机组输出功率低或执行维护的同时进行一定数量的计划维护,该模型结合风电场当天的功率预测数据以及计划维护任务数据,最终输出当天的最佳维护计划安排,算例结果显示该模型能够节约43%的成本。该

模型能够显著提高风电场维护的经济性,但并未考虑恶劣天气对机组可达性的影响。文献[66]在文献[5]的基础上对模型进行改进,使用整体功率预测代替点预测,增加了恶劣天气对机组可达性影响这一约束条件,同时在模型中加入了在恶劣天气时可以利用直升机进行维护这一选择。文献[28]提出了一种分析模型,该模型能够快速计算出进行海上风电场技术维护时的人员及设备运输方式,模型详细考虑了运维人员的数量、运维船种类的选择、是否使用直升机等。在实际海上风电运维过程中,运维船至关重要,因为船只的使用成本占总运维成本的50%左右,运维船的选择会对运维费用产生很大的影响。文献[7, 67-69]分别提出了运维船的调度决策模型,对海上风电场运行状态下的天气参数、机组部件失效特性、运维船规格和船队组成等进行模拟,通过选择最佳的运维船尺寸以及船队规模,能够显著降低维护成本。文献[70]提出了一种基于多智能体系统的混合维护模型,实现多个零部件之间的动态交互的系统建模,同时提出了多标准决策算法以分析和选择不同的维护策略,该模型同时考虑了维护活动成本、能量损失成本和状态监测系统安装成本。文献[71]以最大化海上风电场利润为目标,建立维护策略调度模型,该模型考虑输电线路容量和风电场约束、波浪高度限制和尾流效应,并具备纳入状态监测信息的能力,通过测试系统验证了模型的适用性。文献[72]以全寿命周期维护成本最低为目标,建立确定性模型和随机模型两种维护决策支持模型。其中,确定性模型适用于能够比较准确的获得故障率的场景,而随机模型适用于对故障率确定性较低的场景。以英国海上风电场为例验证两种模型,通过对故障率和风电机组数量的灵敏度分析,得出两者对全寿命周期维护成本近似线性的影响规律。

#### 4.2 计算速度的提升

海上风电场维护调度是一个复杂的多约束问题,求解最佳的调度方案困难。为提高求解最佳运维方案的效率与准确性,文献[73]运用了多蚁群优化算法进行求解,文献[74]建立了带约束的非线性优化模型解决该问题,文献[75]在之前文献的基础上,对海上风电场可靠性及运维经济性进行重新定义,并利用NSGA-II算法对海上风电维护调度方案的带约束非线性多目标规划模型进行求解,获得支持海上风电场维护调度的一组帕累托最优解。使用这些方法能够大量减少求解时间,提高运维安排效率。

### 4.3 维护调度系统开发

海上风电场调度管理员需要同时处理大量的风电机组信息以制定维护调度方案, 该过程需要耗费大量的人力<sup>[76]</sup>。随着海上风电场的大型化发展, 海上风电场迫切需要自动化运维调度决策工具及系统<sup>[77]</sup>, 调度决策系统的功能如图4所示。由于中国海上风电发展时间较短, 目前尚未形成能够适应海上风电的维护调度决策系统。文献[78]概述了现有的商业和非商业调度决策支持系统的主要特点, 并总结归纳了49个决策支持模型, 这些模型涉及了海上物流、电力生产和项目总成本, 在一定程度上覆盖了海上风电场的全生命周期。文献[79]建立强大且灵活的元启发优化模型使得风电场日常维护自动化, 并根据历史数据识别维护方案的优缺点, 预测该计划实施的预期收益。为进一步提高维护调度的自动化及可视化程度, 文献[72, 80]提出了海上风电场维护成本优化决策系统及工具。决策支持系统旨在供海上风电场运营商使用, 其总体目标是应用计划维护策略以降低海上风电场的全生命周期维护成本。

海上风电维护调度系统的建立将对维护工作的秩序和信息的组织方式进行有效的规范, 从全生命周期角度对风电机组等主要设备进行了全面的动态管理, 为优化海上风电场的维护管理奠定了基础, 为风电场的综合决策管理提供了有效的支撑。

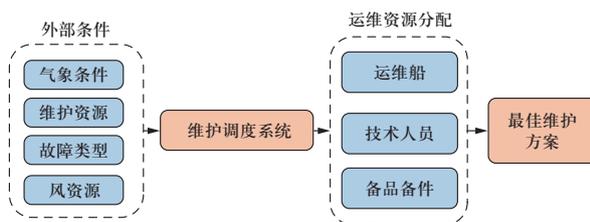


图4 海上风电场维护调度系统

Fig. 4 Maintenance scheduling system of offshore wind farms

## 5 结论

随着海上风电在全球范围内的迅速发展, 海上风电场维护管理已逐渐成为影响海上风电发展的主要因素之一。针对海上风电面临的故障率高、可达性差、运维成本高等3个突出问题, 围绕海上风电维护管理技术的现状及发展进行综述。综合考虑海上风电场所处复杂气象环境和运维活动面临的风险挑战, 从维护策略、路径优化和维护调度决策3个方面综合分析了

海上风电维护管理技术研究现状和发展趋势。

海上风电维护管理技术的发展现状总结如下:

1) 海上风电运行维护策略的研究集中在事后维护、计划维护和状态维护3个方面。事后维护策略只适用于重要程度低、维护成本低的部件, 虽然能在一定程度上节省维护费用, 但会导致更高的电能损失; 计划维护策略是目前海上风电场主要采用的方式, 研究主要集中在对全生命周期内优化维护间隔和对多个零部件进行组合维护以最大化提升维护经济性, 但计划维护策略无法避免维护过度和维护不足的问题; 状态维护策略解决了事后维护和计划维护的不足, 目前的研究主要集中在风电机组故障诊断和寿命预测两个方面, 但状态维护需要安装复杂且昂贵的状态监测系统, 目前在海上风电场中尚未广泛使用。

2) 海上风电维护路径规划问题的难点在于高效快速求解大规模约束下的组合优化问题。由于组合优化问题很难在多项式时间内求得精确解, 目前的研究主要从两个方面解决大规模组合优化求解问题。一方面是简化非线性路径规划模型, 采用线性模型近似代替原非线性优化问题, 求解线性规划模型的精确解; 另一方面采用降维与启发式优化求解方法相结合的方法来降低求解组合优化问题的时间复杂度。现有海上风电路径优化研究能够在一定程度上促进运维船的高效利用。

3) 海上风电场维护调度决策研究能够考虑影响运维成本的因素, 采用不同的模型及算法, 快速、可靠地找出最佳的维护调度安排, 降低运维成本, 提升海上风电场运营效益。但目前海上风电维护调度模型的研究仍然处于理论研究阶段, 考虑因素仍不全面、求解速度不够快、系统还不够完善, 有必要对其进行更深入的研究。

海上风电管理技术研究发展趋势总结如下:

1) 由于单一的维护策略仅适用于特定的零部件, 仅采用单一策略难以满足海上风电对设备可靠性和维护经济性的要求。针对不同可靠性要求的部件采用不同的维护策略, 综合运用事后维护、计划维护和状态维护策略, 在满足可靠性的要求下优化整机综合维护成本的海上风电维护策略是今后的发展趋势之一。

2) 未来海上风电运维将扩展到多运维基地-多风场的集中式大规模海上运维船只维护调度服务模式。为适应未来海上风电场运维需要, 研究远海风电场的运维所需要的子母船结合的运维船路径规划方案, 发展更加高效准确的路径规划算法以适应海上风电场大

型化、集群化发展趋势,考虑实际风浪环境影响下的运维船的时间延迟等是海上运维路径规划需要进一步深入研究的问题。

3) 未来海上风电维护调度决策系统应需要对海上风电场集群内部成百上千台海上风电设备进行统一的维护调度。在海上维护调度模型中纳入更加精准的天气预报信息,高效利用海上运维短暂的时间窗口。在真实的维护场景中,采用更加精细化的维护调度建模方法,发展高效快速的维护调度决策模型求解方法,为解决风电场集群化的维护调度服务奠定基础,是未来海上维护调度方面需要进一步发展和深入的方向。

4) 随着物联网、大数据和人工智能技术愈发成熟,海上风电的智能化运维成必然趋势。基于大数据和人工智能技术的风电设备状态评估与故障诊断技术将提供更加准确的风电机组整机综合性能评估、关键部件故障诊断及预警等设备状态信息;无人机、智能维修机器人等自动化巡检设备的广泛应用将提升风电场巡检效率、安全性和针对性,减少风电场工作人员工作量。结合智能化状态诊断和自动化维护技术的智能维护管理技术将成为未来研究的另外一个重要方向。

随着海上运维的问题逐步突出,海上风电维护管理技术将越来越重要,只有进一步深入研究才能促进海上风电持续健康发展。

## 参考文献

- [1] Scheu M, Matha D, Schwarzkopf M, et al. Human exposure to motion during maintenance on floating offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2018, (165): 293-306.
- [2] Vieira M, Henriques E, Amaral M, et al. Path discussion for offshore wind in Portugal up to 2030[J]. *Marine Policy*, 2018, (100): 122-131.
- [3] Zhixin W, Chuanwen J, Qian A, et al. The key technology of offshore wind farm and its new development in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 13(1): 216-222.
- [4] Wu X, Hu Y, Li Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, (104): 379-393.
- [5] Besnard F, Patriksson M, Stromberg A B, et al. An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system[C]. *IEEE*, 2009.
- [6] Carroll J, McDonald A, Dinwoodie I, et al. Availability, operation and maintenance costs of offshore wind turbines with different drive train configurations[J]. *Wind Energy*, 2017, 20(2): 361-378.
- [7] Dalgic Y, Lazakis I, Turan O. Investigation of optimum crew transfer vessel fleet for offshore wind farm maintenance operations[J]. *Wind Engineering*, 2015, 39(1): 31-52.
- [8] Sarker, R. B, Faiz I, et al. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy[J]. *Renewable energy*. 2016, (85): 104-113.
- [9] Bidwell D. Ocean beliefs and support for an offshore wind energy project[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, (146): 99-108.
- [10] Irawan, Ade C, Ouelhadj, et al. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(1): 76-89.
- [11] 宋庭新, 张甜, 张一鸣, 等. 基于精益MRO的海上风电场运行维护管理技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(2): 387-395.  
Song Tingxin, Zhang Tian, Zhang Yiming, et al. Technology of operation and maintenance management for offshore wind farm based on lean MRO thinking[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(2): 387-395(in Chinese).
- [12] Enevoldsen P, Valentine S V. Do onshore and offshore wind farm development patterns differ?[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2016, (35): 41-51.
- [13] Perveen R, Kishor N, Mohanty S R. Off-shore wind farm development: Present status and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, (29): 780-792.
- [14] Astariz S, Iglesias G. Accessibility for operation and maintenance tasks in co-located wind and wave energy farms with non-uniformly distributed arrays[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, (106): 1219-1229.
- [15] Ding F, Tian Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds[J]. *Renewable Energy*, 2012, (3): 175-182.
- [16] Wang J, Zhao X, Guo X. Optimizing wind turbine's maintenance policies under performance-based contract[J]. *Renewable Energy*, 2019, (135): 626-634.
- [17] Blanco M I. The economics of wind energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6): 1372-1382.
- [18] 刘璐洁, 符杨, 马世伟, 等. 基于可靠性和维修优先级的海上风电机组预防性维护策略优化[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21): 5732-5740.  
Liu Lujie, Fu Yang, Ma Shiwei, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on reliability and maintenance priority[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5732-5740(in Chinese).
- [19] Wu X, Hu Y, Li Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019,(104): 379-393.
- [20] Lu Y, Sun L, Zhang X, et al. Condition based maintenance optimization for offshore wind turbine considering opportunities based on neural network approach[J]. *Applied*

- Ocean Research, 2018, (74): 69-79.
- [21] Feng Z, Chen X, Ming L. Iterative generalized synchrosqueezing transform for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions[J]. Mechanical Systems & Signal Processing. 2015, 52-53(1): 360-375.
- [22] Seyr H, Muskulus M. Decision support models for operations and maintenance for offshore wind farms: A review[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 278.
- [23] Schrottenboer A H, Uit Het Broek M A J, Jargalsaikhan B, et al. Coordinating technician allocation and maintenance routing for offshore wind farms[J]. Computers & Operations Research, 2018,(98): 185-197.
- [24] 郑小霞, 赵华, 刘璐洁, 等. 考虑可及性的海上风机综合维护策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3030-3036. Zheng Xiaoxia, Zhao Hua, Liu Lujie, et al. A combined maintenance strategy for offshore wind turbine considering accessibility[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3030-3036(in Chinese).
- [25] Skaare B, Hanson T D, Nielsen F G. Importance of control strategies on fatigue life of floating wind turbines[C]. ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2007: 493-500.
- [26] Feng Y, Tavner P J, Long H. Early experiences with UK Round 1 offshore wind farms.[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers : energy, 2010, 163(4): 167-181.
- [27] 黄玲玲, 曹家麟, 张开华, 等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 729-738. Huang Lingling, Cao Jialin, Zhang Kaihua, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 729-738(in Chinese).
- [28] F. B, K. F, L. B T. A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2013, 4(2): 443-450.
- [29] 黄必清, 张毅, 易晓春. 海上风电场运行维护系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(4): 522-529. Huang Biqing, Zhang Yi, Yi Xiaochun. Operation and maintenance systems for offshore wind farms[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Technol), 2014, 54(4): 522-529(in Chinese).
- [30] Liu T. Reliability analysis and operation and maintenance strategies of offshore wind turbine[J]. DEStech Transactions on Materials Science and Engineering, 2016 (icimm).
- [31] Mentés A, Turan O. A new resilient risk management model for Offshore Wind Turbine maintenance[J]. Safety Science, 2018.
- [32] Scheu M, Matha D, Hofmann M, et al. Maintenance strategies for large offshore wind farms[J]. Energy Procedia, 2012, 24(24): 281-288.
- [33] 符杨, 许伟欣, 刘璐洁. 海上风电运行维护策略研究[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(3): 219-222. Fu Yang, Xu Weixin, Liu Lujie. Study of operation and maintenance tactics for offshore wind turbine[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(3): 219-222(in Chinese).
- [34] Kerres B, Fischer K, Madlener R. Economic evaluation of maintenance strategies for wind turbines: a stochastic analysis[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(7): 766-774.
- [35] Nguyen T A T, Chou S. Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems[J]. Energy Conversion and Management, 2018, (157): 86-95.
- [36] 符杨, 马媛, 刘璐洁, 等. 海上风电机组分阶段预防性维修策略[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 124-132. Fu Yang, Ma Yuan, Liu Lujie, et al. Phasic preventive maintenance strategy of offshore wind turbine[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(6): 124-132(in Chinese).
- [37] 郭慧东. 海上风电机组运行状态评价与维修决策[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [38] 桑祺, 何焱, 冯笑丹, 等. 面向组合维修的海上风电场运行维护建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 83-91. Sang Qi, He Yan, Feng Xiaodan, et al. Modeling and simulation of combined repair oriented operation and maintenance for offshore wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems. 2016, 40(20): 83-91(in Chinese).
- [39] 符杨, 许伟欣, 刘璐洁, 等. 考虑天气因素的海上风电机组预防性机会维护策略优化方法[J]. 中国电机工程学报. 2018, 38(20): 5947-5956. Fu Yang, Xu Weixin, Liu Lujie, et al. Optimization of preventive opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine considering weather conditions[J]. Proceedings of the CSEE. 2018, 38(20): 5947-5956(in Chinese).
- [40] Song S, Li Q, Felder F A, et al. Integrated optimization of offshore wind farm layout design and turbine opportunistic condition-based maintenance[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, (120): 288-297.
- [41] Hameed Z, Ahn S H, Cho Y M. Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation[J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 879-894.
- [42] Tian Z, Jin T, Wu B, et al. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1502-1509.
- [43] Florian M, Sørensen J D. Risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind farms[J]. Energy Procedia, 2017, (137): 261-272.
- [44] Goyal D, Pabla B S. Condition based maintenance of machine tools:A review[J]. Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology, 2015, (10): 24-35.

- [45] Azevedo H D M D, Ara ú jo A M, Bouchonneau N. A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, (56): 368-379.
- [46] M é rigaud A, Ringwood J V. Condition-based maintenance methods for marine renewable energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, (66): 53-78.
- [47] Zhang C, Gao W, Guo S, et al. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance[J]. *Renewable Energy*, 2016, (103): 606-612.
- [48] 郑小霞, 叶聪杰, 符杨. 海上风电机组状态监测与故障诊断的发展和展望[J]. *化工自动化及仪表*, 2013, 40(4): 429-434.  
Zheng Xiaoxia, Ye Congjie, Fu Yang. Development and prospect of offshore wind turbine condition monitoring and fault diagnosis[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2013, 40(4): 429-434(in Chinese).
- [49] 苏玲霞. 基于B/S模式的大型海上风电机组监测平台研发[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [50] 胡涛, 王致杰, 程亚丽. 基于ZigBee的海上风电机组状态监测系统的设计[J]. *科技与创新*, 2018, (13): 50-53.  
Hu Tao, Wang Zhijie, Cheng yali. Design of condition monitoring system for offshore wind turbine based on ZigBee[J]. *Science and Technology & innovation*, 2018, (13): 50-53(in Chinese).
- [51] Pattison D, Segovia Garcia M, Xie W, et al. Intelligent integrated maintenance for wind power generation[J]. *Wind Energy*, 2016, 19(3): 547-562.
- [52] 刘璐洁, 符杨, 马世伟, 等. 基于运行状态监测与预测的海上风机维护策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3292-3297.  
Liu Lujie, Fu Yang, Ma Shiwei, et al. Maintenance strategy for offshore wind turbine based on condition monitoring and prediction[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3292-3297(in Chinese).
- [53] Shafiee M, Finkelstein M, B é renguer C. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, (142): 463-471.
- [54] 符杨, 许伟欣, 刘璐洁, 等. 基于可及度评估的海上风机机会维修策略[J]. *中国电力*, 2016, 49(8): 74-80.  
Fu Yang, Xu Weixin, Liu Lujie, et al. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine based on accessibility evaluation[J]. *Electric Power*, 2016, 49(8): 74-80(in Chinese).
- [55] Shafiee M. An optimal group maintenance policy for multi-unit offshore wind turbines located in remote areas[C]. *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 1-6.
- [56] Anton Gustavsson, Erik Nyberg. Maintenance optimization of offshore wind power: Concept development for future cost reduction[R]. Chalmers University Of Technology, 2014.
- [57] Halvorsen-Weare E E, Gundegjerde C, Halvorsen I B, et al. Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms [J]. *Energy Procedia*, 2013, 35(41): 167-176.
- [58] Martin R, Lazakis I, Barbouchi S, et al. Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability[J]. *Renewable Energy*, 2016, (85): 1226-1236.
- [59] Dalgic Y, Lazakis I, Turan O, et al. Investigation of optimum jack-up vessel chartering strategy for offshore wind farm O&M activities[J]. *Ocean Engineering*, 2015, (95): 106-115.
- [60] Dai L, StØlhane M, Utne I B. Routing and scheduling of maintenance fleet for offshore wind farms[J]. *Wind Engineering*, 2015,39(1): 15-30.
- [61] StØlhane M, Hvattum L M, Skaar V. Optimization of routing and scheduling of vessels to perform maintenance at offshore wind farms[J]. *Energy Procedia*, 2015, (80): 92-99.
- [62] Dawid R, McMillan D, Revie M. Heuristic algorithm for the problem of vessel routing optimisation for offshore wind farms[J]. *The Journal of Engineering*, 2017, (13): 1159-1163.
- [63] Shafiee M. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives[J]. *Renewable Energy*, 2015, (77): 182-193.
- [64] Raknes N T, Ødeskaug K, StØlhane M, et al. Scheduling of maintenance tasks and routing of a joint vessel fleet for multiple offshore wind farms[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2017, 5(1): 11-35.
- [65] Kovács A, Erdos G, Monostori L, et al. Scheduling the maintenance of wind farms for minimizing production loss[C]. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy)*, 2011.
- [66] Besnard F, Patriksson M, Stromberg A, et al. A stochastic model for opportunistic maintenance planning of offshore wind farms[C]. *PowerTech*, 2011 IEEE Trondheim. IEEE, 2011: 1-8.
- [67] Gundegjerde C, Halvorsen I B, Halvorsen-Weare E E, et al. A stochastic fleet size and mix model for maintenance operations at offshore wind farms[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2015, (52): 74-92.
- [68] Dalgic Y, Lazakis I, Dinwoodie I, et al. Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities[J]. *Ocean Engineering*, 2015, (101): 211-226.
- [69] Sperstad I B, Mcauliffe F D, Kolstad M, et al. Investigating key decision problems to optimize the operation and maintenance strategy of offshore wind farms[J]. *Energy Procedia*, 2016, (94): 261-268.
- [70] Sahnoun M, Baudry D, Mustafee N, et al. Modelling and simulation of operation and maintenance strategy for offshore wind farms based on multi-agent system[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015: 1-17.
- [71] Mazidi P, Tohidi Y, Sanz-Bobi M A. Strategic maintenance scheduling of an offshore wind farm in a deregulated power system[J]. *Energies*, 2017, 10(3): 313.
- [72] Li X, Ouelhadj D, Song X, et al. A decision support system for strategic maintenance planning in offshore wind farms[J].

- Renewable Energy, 2016, (99): 784-799.
- [73] Zhang Z Y. Scheduling and routing optimization of maintenance fleet for offshore wind farms using Duo-ACO[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1(3): 294-301.
- [74] Tan H, Wei L V, Jin L, et al. Modeling and solution of offshore wind farm maintenance scheduling[J]. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, 2016 (SEEE).
- [75] Zhong S, Pantelous A A, Beer M, et al. Constrained non-linear multi-objective optimisation of preventive maintenance scheduling for offshore wind farms[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, (104): 347-369.
- [76] 杜勉, 易俊, 郭剑波, 等. 以可靠性为中心的维修策略综述及其在海上风电场运维中的应用探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2247-2254.
- Du Mian, Yi Jun, Guo Jianbo, et al. Review on reliability centered maintenance strategy and applications to offshore wind farm operation and maintenance[J]. Power System Technology. 2017, 41(7): 2247-2254(in Chinese).
- [77] Endrerud O E V, Liyanage J P, Keseric N. Marine logistics decision support for operation and maintenance of offshore wind parks with a multi method simulation model[C]. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. IEEE Press, 2014: 1712-1722.
- [78] Hofmann M. A review of decision support models for offshore wind farms with an emphasis on operation and maintenance strategies[J]. Wind Engineering, 2011, 35(1): 1-15.
- [79] Stock-Williams C, Swamy S K. Automated daily maintenance planning for offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2019(133): 1393-1403.
- [80] Hofmann M, Sperstad I B. NOWIcob – A tool for reducing the maintenance costs of offshore wind farms [J]. Energy Procedia, 2013, 35(41): 177-186.

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-02-03。

作者简介:



刘永前

刘永前 (1965), 男, 教授, 研究方向为风电机组状态监测与故障诊断, 风电场优化设计和功率预测, E-mail: yqliu@ncepu.edu.cn。

马远驰 (1992), 男, 博士研究生, 研究方向为风电机组传动系统状态诊断, E-mail: yuanchima@yeah.net。

陶涛 (1995), 男, 博士研究生, 研究方向为风电机组状态诊断, E-mail: taotao@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)