

海上风电船机与风电设备故障分析及应对策略综述

初岳峰, 王凯, 肖忠铭, 徐天殷, 郭志群

引用本文:

初岳峰, 王凯, 肖忠铭, 徐天殷, 郭志群. 海上风电船机与风电设备故障分析及应对策略综述[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 9-19.
CHU Yuefeng, WANG Kai, XIAO Zhongming, XU Tianyin, GUO Zhiqun. Fault Analysis and Countermeasures of Wind Turbine Installation Vessel's Key Equipment and Wind Power Equipment[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(1): 9-19.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

海上风电机组智能故障预警系统研究

Research on Intelligent Fault Warning System of Offshore Wind Turbines

南方能源建设. 2018, 5(2): 133-137 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019>

智慧海上风电场的定义、架构体系和建设路径

Definition, Architecture and Constructive Route of Intelligent Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2020, 7(3): 62-69 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.008>

浅析海上风电施工安全管控

Brief Analysis on Safety Management and Control of Offshore Wind Farm Construction

南方能源建设. 2020, 7(1): 128-132 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.021>

浅谈海上测风塔工程EPC总承包风险管理

Discussion on Risk Management of Offshore Wind Tower Engineering Under EPC Mode

南方能源建设. 2017, 4(z1): 168-173 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.032>

海上风电场智能船舶调度及人员管理系统

Scheme Design of Intelligent Vessel Dispatching and Personnel Management System for Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2020, 7(1): 47-52 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007>

海上风电船机与风电设备故障分析及应对策略综述

初岳峰¹, 王凯^{1,2}, 肖忠铭¹, 徐天殷³, 郭志群^{1,2,✉}

(1. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东珠海519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海519082;
3. 广东精钢海洋工程股份有限公司, 广东佛山528000)

摘要: [目的] 海上风电船机及风电设备故障时常发生。为了减少风电故障发生的频率, 需要对安装船机设备提出新的设计要求和具体故障的应对策略。[方法] 通过对风电船机及设备的故障类型的对比研究分析, 深入剖析各个故障类型发生的原因并提出相对应的应对策略。[结果] 海上风电工程建设中, 安装船机及风电设备主体是两大工程器械, 也是施工过程中出现故障频率最高的主体。通过采用文章中所提出的故障应对策略, 可以最大程度的避免故障的发生, 最大限度地提高设备的使用寿命。[结论] 通过总结近期发生的海上风电故障发现, 故障发生的原因主要是人为的操作不当以及自然环境的极端海况。在风电场的施工建设和运维过程中, 采取相应的故障应对策略是十分必要的。

关键词: 海上风电; 风电安装船; 风电设备; 故障; 运维

中图分类号: TK89; U674.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)01-0009-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fault Analysis and Countermeasures of Wind Turbine Installation Vessel's Key Equipment and Wind Power Equipment

CHU Yuefeng¹, WANG Kai^{1,2}, XIAO Zhongming¹, XU Tianyin³, GUO Zhiqun^{1,2,✉}

(1. School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sun University, Zhuhai 519082, Guangdong, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China;
3. Guangdong Keen Offshore Engineering Co., Ltd., Foshan Guangdong 528000, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Offshore wind turbine installation vessel and wind turbine equipment faults occur frequently. In order to reduce the frequency of faults, new requirements and specific fault countermeasures need to be proposed for the installation vessel and equipment. [Method] Through the comparative research and analysis of the fault types of wind turbine vessel and equipment, the causes of each fault type were deeply analyzed and corresponding countermeasures were proposed. [Result] In the construction of offshore wind turbine, the installation vessel and the main wind turbine equipment are two major engineering instruments, which are most likely to break down. By adopting the fault countermeasures proposed in the paper, the occurrence of fault can be avoided to the greatest extent and the service life of the equipment can be improved to the maximum extent. [Conclusion] By summarizing the recent offshore wind power faults, it is found that the main reasons for the faults are improper operation and extreme sea conditions. In the process of wind farm construction, operation and maintenance, it is necessary to adopt corresponding fault countermeasures.

Key words: offshore wind power; wind turbine installation vessel; wind turbine equipment; fault; maintenance

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-03-30 修回日期: 2021-12-09

基金项目: 广东省自然资源厅2020年省级促进经济高质量发展专项资金“高效智能海上风电施工安装船机关键设备研制及产业化”(粤自然资合GDNRC[2020]015号)

0 引言

随着海上风电的进一步大力发展,相关的风电事故及故障也不断发生。全球海上风电健康与安全组织G+出版的研究报告指出,2019年全球共发生62起海上风电行业人身伤害事故,较2018年的39起显著增多。其中28起为船上事故,占比45%,且大多与运维船相关;风机事故15起,占比24%;陆上事故17起,占比28%,另有2起其他事故^[1]。

据统计,在海上风电行业中,事故发生率约为4.55次/百万工作小时,而在海洋油气行业中,这一数字仅约0.9次/百万工作小时。由此可见,在安全标准的制定及执行情况方面,海上风电行业相对不完善,在预防故障发生方面仍有所不足。因此对海上风电故障类型、诱因以及相关应对策略开展研究,避免环境破坏及经济损失,对于海上风电的安全施工和运维具有重大现实意义。

自20世纪60年代英国机器保健中心成立和美国机械故障预防小组成立以来,故障诊断技术逐渐在世界范围内推广。风电机组的故障诊断技术作为一种可以有效降低运营成本的手段,自然深受学术界和风电企业的关注。Wilkinson^[2]等为了检测风机的状态,对不同的传感器和信号处理技术的适用性进行了评估,选取了成本较低可靠性较高的发电机及相关组件的状态检测方案;Musial^[3]等和Huang^[4]等则提出了针对传动系统的检测方法。前期的研究大多关注传动系统、电气系统和叶片等方面,这些方面的故障导致停机时间较长,维修成本也最为昂贵。前期大部分研究往往是关键部件的故障分析,缺少用于商业化的耦合智能故障诊断。如何减少人工检查频次,提高故障检测的智能化程度与精确度是目前研究的重心。

故障预测与视情维修方法是风机实现自主保障的关键技术,现阶段的研究重心是结构损伤的预测方法,通过对结构的检测和评估可以了解目前的健康情况以及预测结构损伤的变化趋势。基于振动分析方法是风机损伤诊断最常见的方法,Abouhnik^[5]提处理基于振动分析和EDHL方法的风机叶片损坏方法;Lekou^[6]通过检测风机关键设备的振动相关数据,应用了声发射技术并采用多传感器技术,加强了对风机中旋转器械的状态诊断,得到的分析结果可以作为评估风机设备的健康状态的重要指标;

Hameed^[7]采用BP神经网络对分级的齿轮箱和发电机进行了建模分析,并且采用多Agent方法对多个设备的预测结果进行了综合分析,结合运行状态检测系统和故障检测系统,从而给出风机的整体运行状态。

目前广泛配备在风电装备上的检测系统为SCADA(Supervisor Control and Data Acquisition,数据采集与监视控制)^[8],该监测系统通常是对风电装备运行时一些基本的情况进行检测,如电流、电压、并网情况等,具有简单的报警和报告功能,但检测的状态参量有限,缺乏对关键部件得振动分析以及故障诊断功能,无法很好地预防故障的发生。

随着全球风电行业的迅速发展,国外较早就开发了专门用于风电装备的状态检测设备与相关的分析软件,国内虽然也有类似的研究但与国外相比仍有一定的差距。

本文关注海上风电领域的故障分析与应对策略,不仅仅关注了海上风机本身的故障,还考虑风电设备运输与安装可能的故障,旨在为我国海上风电故障检测与智能诊断的技术发展提供帮助,进一步降低风机建设、发电和运维成本。

1 船机关键设备和风电设备故障形式

风电船机设备故障与风机设备故障是海上风电发生故障频率最高的两个主体。风电故障类型见图1。风电船机设备故障主要发生在海上运输事故以及船机的关键设备的故障;风机设备主题故障主要发生在风机的轮毂和叶片部位,主要包括机械故障和电气故障。

1.1 海上交通事故

近年来,海上风电相关工程作业的密度和频率逐渐增大,海上风电安装船、运维船的研发建造和运营使用也得以促进。在海上风电行业蓬勃发展的同时,相关事故也时有发生,其中与船机关键设备相关的船上事故占比最大。根据风电安装船、运维船的运营作业过程,可将相应的事故分为海上交通事故和作业事故。

风电安装船体积和载重较大,且配备有吊机、桩柱腿等工程设备,对船舶的稳性和操纵性影响较大。对于大部分平台式结构的风电安装船而言,自

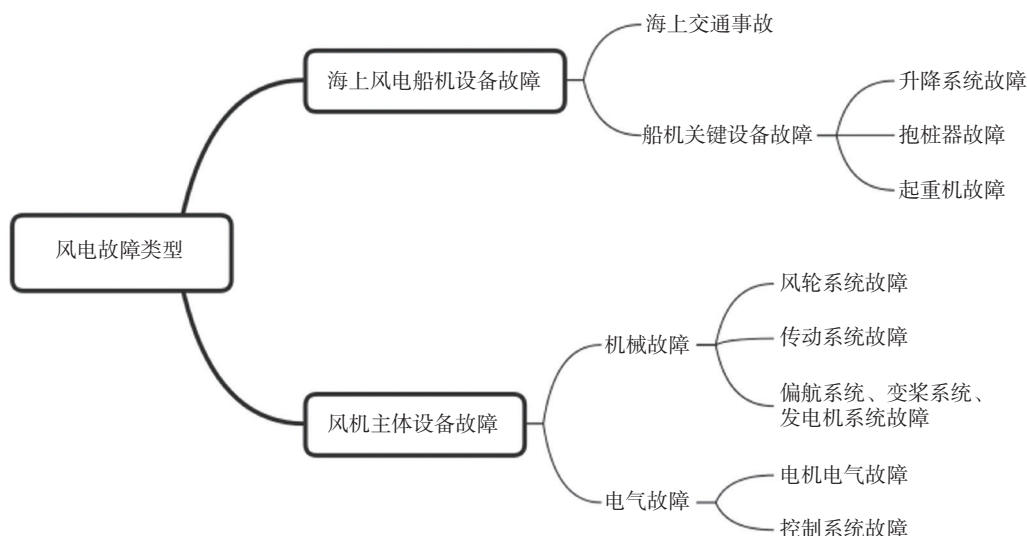


图 1 风电故障类型

Fig. 1 Wind power fault types

航平台虽然具有一定机动力，但其自身结构的流线性较差；非自航平台则需要其他船舶顶推或者拖带协助移动，机动力和操纵性都比较差。

上述原因导致风电安装船在靠离泊、航行以及锚泊过程中，面对复杂的水文、气象、通航环境，在避碰、绕障、避险、应急时往往不具备及时主动应变的能力，容易陷入紧迫局面从而导致事故发生，主要包括倾覆、搁浅、碰撞等。此类事故通常会对船舶造成整体影响甚至破坏，带来巨大的损失，但可以通过规范合理的操作办法有效规避预防，总体而言不确定性较小。

2016年5月12日，在江苏省某海上风电项目开展施工作业的“宝隆706”与“灌云渔60210”发生碰撞，导致“灌云渔”沉没（见图2）。船上15人全部落水，其中8人获救，7人死亡，构成了较大等级的水上交通事故。“灌云渔”的不安全驶离动作是本起事故发生的直接原因。事故的直接原因还包括拖带船组疏于瞭望观察，“灌云渔”渔船违规载客，未经批准违规进行水上作业。此外，船员证书不适任，分包队伍劳动纪律松懈，安全技术交底缺乏针对性，未完善安全检查，责任制不健全，项目部对进场船舶控制不严等是引起本次事故的间接原因^[9]。

2019年2月19日，波罗的海海域，在距离德国Rügen岛东北方向几海里处，World Bora号海上风电运维船与Raba号货船相撞。事故导致运维船上

图 2 “灌云渔60210”沉没^[9]Fig. 2 "Ghuanyun fishing 60210" was sinking^[9]

15人受伤，2人伤势严重，两艘船发生不同程度损坏（见图3、图4）。World Bora号运维船上共载有4名船员、11名风场运维人员，当时World Bora号正要驶向Wikinger海上风电场开展运维作业^[10]。

风电安装船的机动力和操纵性明显弱于普通船只，如何预防事故发生以及在发生事故时的应急措施都是十分必要的。

1.2 船机关键设备故障

升降系统、抱桩器、起重机是自升式风电安装船的关键船机设备。升降系统常见的几种故障包括绳索失效、滚筒失效及轴瓦失效等，海上风电安装船的起重机、抱桩器长期作业于恶劣的离岸环境中，且定期检测、维修的时间间隔较长，其传动系

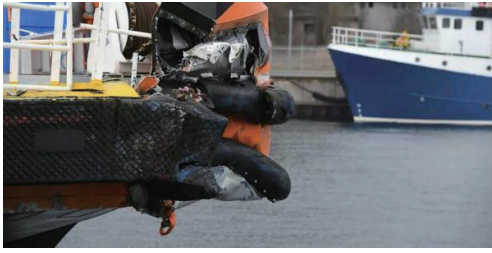


图3 “World Bora”号船艏受损^[10]

Fig. 3 The bow of the "World Bora" was damaged^[10]



图4 “Raba”号货轮右舷严重受损^[10]

Fig. 4 The freighter "Raba" suffered serious damage to starboard^[10]

统的重要部件较易在运行过程中出现故障^[11]。

2020年5月8日晚,英国860 WM Triton Knoll 风场,全回转起重船 Seaway Strashnov 号在单桩基础施工过程中发生事故,导致5人受伤^[12]。2020年6月15日, Heerema Marine Contractors 旗下的起重船 Aegir 号在打桩施工过程中发生桩锤坠落。事故发生于台湾彰化海上风电项目,事发当时该安装船正在进行导管架桩基础沉桩作业,所幸未造成人员伤亡,事故导致桩基础和桩机部分损坏^[13]。2018年8月23日, Swire Blue Ocean 公司的自升式平台 Pacific Osprey 上的吊机发生吊臂断裂(见图5),砸到下方驾驶舱和船上悬梯,事故造成一人重伤、三人轻伤、船体损坏。事故发生时,该自升式平台停泊在荷兰 Eemshaven 港^[14]。

2020年5月2日,风电安装船“Orion 1”在德国 Rostock 码头发生重大事故,船上起重机在进行载荷测试时发生折断(见图6)。此次事故造成起重机严重损坏,船体受损,人员受伤,经济损失超过5 000万欧元。此次损坏的起重机型号为 HLC 295000,由 Liebherr 提供,极限载荷为5 500 t,在载荷测试期间发生吊钩破坏,最终导致吊臂



图5 Pacific Osprey 自升式平台发生吊机坍塌事故^[13]

Fig. 5 The crane on the jack-up platform "Pacific Osprey" collapsed^[13]



图6 吊臂折断的 Liebherr HLC 295000 起重机^[14]

Fig. 6 Liebherr HLC 295000 with broken crane jib^[14]

折断^[15]。

2020年9月,在广东汕尾某海上风电项目施工的全回转起重船发生大臂折断事故(见图7)。事发时该船正在进行单桩基础安装,事故是由起重机动器的关键部件损坏引起的^[16]。

该故障也是我国需要重点关注的问题,海上风电增长迅速,而与之配备的海上风电安装设备却没有到位,存在安装设备不足、不匹配等种种安全隐患。

1.3 风电设备结构故障

风电设备往往体积、重量巨大,在生产作业过程中需要承受巨大的载荷,在结构强度、材料强度、电路稳定性、检修规范、失控保护机制等方面都有着极高的技术要求。任一环节的缺失或不足都有可能引发故障,轻则影响正常生产作业计划,重则引发严重事故造成巨大损失。

2019年4月12日,甘肃某风电场发生风机塔筒倒塌,当时工作人员正在进行风机定检工作。事故

图 7 起重船大臂折断^[15]Fig. 7 The floating crane with broken jib^[15]

造成 4 人死亡, 1 人重伤, 1 人轻伤^[17]。2020 年 5 月 4 日, 河南某风电场 3 台风机桨叶折断。事故原因系风机叶片质量问题, 在叶片的生产过程中, 存在工艺缺陷, 腹板粘接出现了空泡、缺胶、少加强筋等质量缺陷。进而导致风机在长期运行过程中产生了腹板支撑失效、叶片开裂变形等问题, 进而引起了叶片结构强度的不足^[18]。2020 年 7 月 17 日, 河北某风电场发生一起倒塔事故, 直接原因是事故风机的第一节与第二节塔筒连接螺栓的断裂^[19]。2020 年 11 月 21 日, 瑞典 Aldermyrberget 风电场的一台维斯塔斯 V150-4.2 MW 风机发生倒塔事故, 所幸未造成人员伤亡^[20]。

可以看出, 海上风电系统设备结构复杂, 系统失效模式数量庞大, 在不利的海洋环境下使风机的故障率升高^[21-22], 为避免海上风电系统在设计使用寿命内发生损坏, 风机各个设备及结构必须具有很高的强度和健康的工作状态^[23-24]。然而, 近些年来, 由于设备监测工作及损伤预测方法的不完善, 海上风电系统损坏事故时有发生, 造成了财产的损失和海洋环境的破坏。近年来, 发生了多起风机倒塔事故, 其原因则包括软硬件失效、叶片失速、设备质量、螺栓断裂或松动引起塔架震动疲劳开裂等。

1.4 风电设备火灾

不论是海上风电还是陆上风电, 火灾都是威胁风电机组安全的重大隐患。2020 年 1 月 12 日, 辽宁某风电场发生风电机组火灾, 事故导致风电机组舱损毁, 轮毂及三只叶片根部被烧损, 熔断器发生爆熔喷出, 箱变门发生变形^[25]。风电机组的火灾主要由雷击、电气短路、润滑油泄漏、过热等原因

引起。风机避雷设施不完备使雷击火灾风险加大, 变压器本身故障或污闪可导致电气短路引起火灾, 润滑油泄露后与高温的机组设备表面接触发生燃烧, 机械制动产生的热量和飞溅的火花可点燃易燃物。

2 故障的环境诱因

海上风机相较于陆上风机具有更加复杂的恶劣环境, 风机故障发生的频率更为密切。复杂而随机的海况环境给风机故障的发生带来了潜在隐患, 其环境诱因主要包括自然环境和人为环境两大方面。

2.1 自然灾害

风场的选址首先着重考虑风力资源的丰富程度, 但是较高的能源密度往往也伴随着不确定性较大的危机, 包括台风、极限阵风、巨浪等恶劣天气条件, 对于风电设备而言则意味着巨大的隐患。

2013 年 9 月 22 日, 台风“天兔”登陆广东汕尾, 给广东沿海的风电场带来巨大冲击。汕头红树湾风电场的 25 台风电机组中的 8 台机组发生倒塔, 9 台机组叶片折断, 台风“天兔”造成该风场损失近一亿元^[26]。2014 年 7 月, 强台风“威马逊”过境海南、广东、广西, 多地出现灾情。台风过后, 共有 13 台风机被吹倒, 5 台风机损坏, 无法运行^[27]。2017 年 7 月 14 日, 江苏省滨海县黄海海域附近出现强雷电天气, 某海上风电场项目海上升压站的 35 kV 电缆产生爆燃。事故发生后, 19 人跳海求生, 其中 18 人获救, 1 人失踪^[28]。

对于台风这种突发的极端海况, 其海况条件远远超过了最初设计的参数要求。因此我们在设计海洋结构平台时应进一步提高平台的安全系数从而提高极端海况条件下的稳定性, 在考虑经济效益的同时考虑极端情况的应对方案。

2.2 人员不当操作

规范的生产管理制度, 完备严格的安全意识, 是所有工业生产过程中的安全保障, 对于风电设备而言, 更是如此。在日常生产作业、检修维护、安装运输等环节中, 规范性和安全意识的缺失极易导致人为操作事故的发生。运维人员业务能力的提高, 可有效避免人为操作不当引起的事故, 如螺栓未预紧、人员触电、人员高处坠落等。

2020年8月9日,山东烟台某风电场1名作业人员在场内巡线过程中,使用园林伸缩锯时,由于安全距离不足发生感应触电,经抢救无效死亡^[29]。2020年8月9日,内蒙古某风电场1名运维检修人员在处理风机导轨变形问题时,在爬梯过程中,因未正确悬挂安全带,从10 m左右高度坠落,经抢救无效死亡^[30]。2020年8月20日,内蒙古某风电施工现场,作业人员在风机机舱吊装过程中,拉扯缆风绳时误触碰到35 kV杆塔导线,导致1名作业人员触电身亡^[30]。

对于认为环境抑或是认为操作不当引起的故障形式,应该完善海上风机作业过程中的各种安全制度,提升对风电施工人员的安全教育工作以防范风机故障的发生。

前述的事故也许或多或少有着人为的因素,但相关设备、技术与规范的不完善是业界的共识,海上风电的制作成本高于陆上风电,维护成本更是陆上机组的两倍以上,严重影响着风电场的经济效益。为了降低经济损失与维护成本,必须尽量将大量矫正性维护转变为预防性维护,减少严重故障的发生,但也要在故障发生时,采取合理的应对措施以减少故障的发生。

3 应对策略及设计要求

由于船机关键设备和风电设备的工作环境特殊性,其工作载荷一般较大,在面对各种恶劣气象环境和突发因素时,设备应能够承受巨大载荷的考验。船员和运维人员的专业素养,是确保海上风电交通安全的关键。风电安装船、运维船成熟的技术保障和完善的操作规程,是海上风电安装运维的基本依赖,目前相关的规范仍然不算特别的完善^[30]。因此,船机关键设备作业事故、海上风电设备运行故障的应对策略是海上风电工程的重要保障。

3.1 风电安装船升降系统故障

风电安装船、运维船在设计建造、实验、实地安装和检修保养等作业过程中,存在诸多不确定性因素的影响,包括气象、水文环境、操作方式等。其设计合理性、结构强度以及材料强度应能够承受相当的载荷并符合严苛的要求,以最大程度地避免作业事故发生。

通过分析升降系统的典型故障可知,由绞车轴

瓦失效引起的升降系统故障,可依据其机理对工作绞车结构进行优化,保护升降系统的安全运行^[31]。海洋环境载荷与海洋结构物之间作用载荷的研究,是海洋工程开发的研究重点^[32]。对风、浪、流等海洋环境载荷进行合理的统计分析,依据风浪流对结构物的作用规律,掌握桩腿与海底岩土的作用载荷对桩腿的作用机理,深入研究海洋环境荷载与桩腿之间的相互作用^[33],进而更加准确地分析其作为结构物在海洋条件下作业过程中的受载情况,实现对风机吊装过程的精准分析和控制。

3.2 风电安装船起重机故障

起重机是风电安装船的关键部件之一,其主要作用便是起吊风电设备到一定的高度进行安装。动力传动系统是起重机的核心部分,在整个安装过程中起着传递动能的作用。起重机传动系统包括钢缆卷筒、齿轮箱,其中的承载部件主轴轴承和传动部件齿轮是决定传动系统能否安全稳定运行的关键部件^[34]。在海上风电场建设施工过程中,空气湿度相较于陆地较高,起重机在起吊风机叶片安装时受风浪影响存在低频晃动。传动系统长期工作在不稳定的中低速重载状态下,受到不同交变载荷的作用,其中的关键部件极易发生各类缺陷损伤,导致传动系统的传动精度和稳定性下降,直接影响风机的安装精度以及吊装作业的安全性。

我国的海上风电安装行业发展相对较晚,该领域相关的监测、诊断与维护技术还有待完善^[35]。开展海上风电起重机传动系统关键部件的故障诊断研究,对海上风电场施工建设效率的提高有很大的促进作用,同时也为风电设备安装的安全性和风电设备工作的可靠性提供了保障。机械故障诊断方面的研究已经比较成熟,但是缺少海洋工程装备故障诊断的研究,特别是缺乏针对海上风电起重机传动系统关键部件早期微弱故障检测的研究;起重机传动系统在海上高湿度以及平台晃动的恶劣环境中运行,其轴承部件会产生特殊的带状点蚀和微振磨损缺陷。因此,需开展针对特殊缺陷的故障模式识别的研究^[11]。

3.3 风电设备故障

海上风机是一个大型多设备系统,且结构复杂,故障类型多种多样,在运行过程中承受的海洋环境荷载复杂多样,故障率较高。事故会导致严重

的停机损失, 以及海洋环境污染等后果。此外, 由于海上风机吊装成本高, 在风浪条件下船只可及性差, 故障停机时间长, 因此其维护成本很高。

不同于陆上风电, 离岸风力发电场的建设和维护受天气和海洋环境的影响很大。机舱中的关键设备若发生故障, 在其维修过程中将面临高额的吊装船费用以及较大的技术风险, 费时费力^[36]。同时, 受风浪等海洋环境条件影响, 维护船只可及性差, 故障停运时间更长, 经济损失更大。因此, 海上风机的轮毂、齿轮箱、发电机等主要设备的维护和保养显得更加重要。国内金风科技有限公司维护统计数据表明, 海上风电系统维修工作费用成本占海上风电场总投资的 30% 左右。开发先进的维护技术和方法有利于减低整个工程的运行成本, 提高总回报率。

故障预测技术能够预测系统健康的发展趋势, 提供维护决策, 进而提高设备的可靠性和利用率, 降低停机损失。预防性维护有助于制定海上风电系统的维护计划, 将海上风电传统的被动维修方式转变为主动维护。故障预测和预防性维护是实现设备和系统自主保障的关键技术。在海上风电领域, 仍需进行方法改进以提高海上风电机组的可靠性, 进一步降低整体维护成本^[37]。

考虑到海上风电机组故障率较高, 海上风电场可及性较差, 且故障修复耗时较长, 海上风电机组的容错运行能力应用前景广泛。目前海上风电机组的容错研究主要包括容错拓扑结构的改进、控制算法的优化, 即硬件容错和软件容错^[38]。在硬件容错方面, 可在原系统基础上加入备份式冗余设计; 可应用变流器拓扑结构设计, 针对永磁同步风力发电系统和双馈异步风力发电系统分别采取不同的拓扑结构容错设计; 可采用具有更高容错性的五相电机、六相电机、九相电机等多相电机。软件容错方面, 当前研究集中在脉宽调制 (PWM) 算法的改进、矢量控制容错系统的 PWM 调制方法的改进、直接功率控制和直接转矩控制的优化、滞环电流控制优化等。

新能源高比例接入电网后, 电网故障引起的电压和频率扰动可能导致海上风电的大规模脱网。孟凡成等^[39]提出了一种计及集中式和分布式新能源的电力系统连锁故障动态模型, 模拟了元件的保护

逻辑, 分析了源—网—荷之间的故障交互动态。模拟结果表明, 较高的新能源渗透率使连锁故障中源—网—荷的耦合更加紧密。

3.4 海上风电设备故障的诊断与监测

对于海上风电场而言, 传统的计划维修和故障维修已不能满足需求。为了保证海上风电机组的稳定运行, 降低其维护、状态监测和故障诊断成本是非常必要的。海上风电机组中故障率较高的部件主要有齿轮箱、发电机、电子装置、叶片等。优化其故障诊断方法有助于提高风电机组的可靠性, 进而降低运维成本^[40]。

构建风电机组结构健康检测系统是减少事故发生率、降低运维成本的有效举措。针对风电设备故障, 首先对风电机组关键设备及核心部件进行连续监测, 实时采集风电设备的状态监测数据, 再通过信号处理、统计分析、深度学习等技术手段, 实现风电设备的健康评估、智能诊断以及故障检测, 从而指导运维决策的优化。风电机组的状态监测及故障诊断系统应尽可能地与其它系统集成共享, 统一收集和传输数据, 构建准确高效的海上风电场监控系统^[41], 提高运维效率, 降低运维成本。

基于机器学习算法的智能故障监测和诊断, 有助于运营安全风险的降低, 是今后智慧海上风电场运行管理中的关键技术。目前, SCADA 系统在风电行业中广泛应用, 该系统监控风机过程中, 风电机组的运行状态由各个传感器数据反映^[42]。SCADA 系统能够记录较长周期的信息, 为风电机组故障诊断提供丰富的数据来源^[43-44]。对于 SCADA 所记录的数据, 可通过人工神经网络识别其中的警报信号, 进而侦测风机变桨系统的异常状态^[45]。对于变桨系统而言, 可分析零部件的状态监测数据或搭建故障模型, 对变桨系统故障进行诊断。在线检测技术通过多种传感器和通信方法, 实时传输监测数据, 可对多项关键参数进行实时观测, 包括支撑结构状态、电缆状态、环境参数、海域数据等^[46]。应用在线监测技术, 不仅能降低大量运维成本, 还可有效减少海上风电运营的安全风险。

基于数据驱动的风电设备故障特征提取与机器学习算法的结合, 是风电设备故障诊断技术的发展方向。通过数据挖掘、信号处理、机器学习以及统计分析方法等数据分析技术, 识别和分类风电设备

的故障状态,进而提供设备运维的决策支持^[47]。基于机器学习的故障诊断和监测技术,可为风电设备计划维护与视情维护策略的制定提供指导,从而降低故障诊断成本,提高海上风电场的管理效率。

4 结 论

随着海上风电的快速发展,相关故障也逐年增多。海上风电的故障形式可分为风电安装船、运维船的海上交通事故,包含升降系统、抱桩器、起重机等的船机关键设备故障;风电设备结构故障包含塔架、机组故障等以及风电设备的火灾。本文对海上风电中常见的如风电安装船升降系统、起重机等船机关键设备故障以及海上风电设备故障等故障形式进行了总结,提出了相对应的应对策略和设计要求。

其中,有效应对策略一是根据升降系统运作机理对工作绞车结构进行优化,保护升降系统的安全运行;二是开展特殊缺陷的故障模式识别的研究,依据风浪流对结构物的作用规律,掌握桩腿与海底岩土的作用载荷对桩腿的作用机理;三是对风机吊装过程进行精准分析和控制,开展海上风电起重机传动系统关键部件的故障诊断研究,以提高海上风电机组的可靠性;四是构建基于机器学习算法的风电机组结构健康检测系统,减少事故发生率,降低运维成本。本文对现有与海上风电机组相关的故障问题进行总结、分类,为海上风机故障的研究人员提供参考,在此基础上介绍了相应的应对措施,目前海上风电仍然需要降低成本,而在风机故障与运维方面仍然有着很大的提升空间。

参考文献:

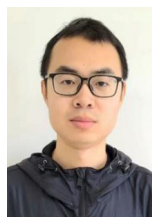
- [1] G+ Global Offshore Wind Health & Safety Organisation. 2019 incident data report [R/OL]. (2020-07-09) [2020-12-09]. https://publishing.energyinst.org/_data/assets/file/0010/753166/2019-Incident-data-report-FINAL-110620jk.pdf.
- [2] WILKINSON M R, SPINATO F, TAVNER P J. Condition monitoring of generators and other subassemblies in wind turbine drive trains [C]//IEEE. 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines. Cracow, Poland, September 6-8, 2007. Cracow: IEEE, 2007: 388-392. DOI: 10.1109/DEMPED.2007.4393125.
- [3] MUSIAL W, BUTTERFIELD S, MCNIFF B. Improving wind turbine gearbox reliability [R]. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2007.
- [4] HUANG Q, JIANG D, HONG L, et al. Application of wavelet neural networks on vibration fault diagnosis for wind turbine gearbox [C]//Springer-Verlag. 5th International Symposium on Neural Networks. Springer-Verlag. Beijing, China, September 24-28, 2008. Beijing: Springer-Verlag, 2008: 313-320. DOI: 10.1007/978-3-540-87734-9_36.
- [5] ABOUHNIAK A, ALBARBAR A. Wind turbine blades condition assessment based on vibration measurements and the level of an empirically decomposed feature [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64: 606-613. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.06.008.
- [6] LEKOU D, MOUZAKIS F, ANASTASOPOULOS A, et al. Fused acoustic emission and vibration techniques for health monitoring of wind turbine gearboxes and bearings [C]//The European Wind Energy Association. European Wind Energy Conference and Exhibition 2009 (EWEC 2009), Marseille, France, March 16-19, 2009. New York, USA: Curran Associates, Inc, 2010: 546-555.
- [7] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review [J]. Renewable and Sustainable energy reviews, 2009, 13(1): 1-39. DOI: 10.1016/j.rser.2007.05.008.
- [8] 梁颖,方瑞明.基于SCADA和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J].电力系统自动化,2013,37(14):7-12+31. DOI:10.7500/AEPS201209163.
- LIANG Y, FANG R M. An online wind turbine condition assessment method based on SCADA and support vector regression [J], 2013, 37(14): 7-12+31. DOI: 10.7500/AEPS201209163.
- [9] 北极星风力发电网.海上风电安装船舶碰撞较大事故案例分享 [EB/OL]. (2019-03-26) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190326/971022.shtml>.
- FD. BJX. COM. CN. Large accident case sharing of offshore wind power installation ship collision [EB/OL]. (2019-03-26) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190326/971022.shtml>.
- [10] 北极星风力发电网.突发!重伤2人 德国海域发生海上风电运维船撞船事故 [EB/OL]. (2019-02-20) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190220/963759.shtml>.
- FD. BJX. COM. CN. . sudden!A two people were seriously injured in an offshore wind power operation ship collision off the coast of Germany [EB/OL]. (2019-02-20) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190220/963759.shtml>.
- [11] 冯毅.海上风电起重机传动系统关键部件故障诊断研究 [D].南京:南京理工大学,2017.
- FENG Y. Research on fault diagnosis for the key components of the transmission system of offshore wind turbine installation crane [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.

- [12] 国际风力发电网. 欧洲近期第三起事故!海上风电安全敲响警钟 [EB/OL]. (2020-05-19) [2021-03-30]. <https://wind.in-en.com/html/wind-2382940.shtml>.
Wind. IN-EN. com. Third recent accident in Europe! The alarm of offshore wind power safety is ringing [EB/OL]. (2020-05-19) [2021-03-30]. <https://wind.in-en.com/html/wind-2382940.shtml>.
- [13] 北极星风力发电网. 溜桩!台湾一在建海上风场发生安全事故 [EB/OL]. (2020-06-19) [2021-03-30]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200619/1082512.shtml>
FD. BJX. COM. CN. Pile! Slip a safety accident occurred in a offshore wind farm under construction in Taiwan [EB/OL]. (2020-06-19) [2021-03-30]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200619/1082512.shtml>.
- [14] 北极星风力发电网. 海上风电自升式安装船发生吊机坍塌 [EB/OL]. (2018-08-27) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180827/923571.shtml>.
FD. BJX. COM. CN. Crane collapse of offshore wind power jack up mounting ship [EB/OL]. (2018-08-27) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180827/923571.shtml>.
- [15] 龙de船人网. Orion 1吊机事故背后的"不寻常"与"寻常"[EB/OL]. (2020-05-19). [2021-03-30]. <https://www.imarine.cn/article-9574-1.html>.
Website"www.imarine.cn". "Unusual" and "unusual" behind Orion 1 crane accident [EB/OL]. (2020-05-19) [2021-03-30]. <https://www.imarine.cn/article-9574-1.html>.
- [16] 北极星风力发电网. 突发事故!广东一在建海上风场起重船大臂折断 [EB/OL]. (2020-09-14) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200914/1104212.shtml>.
FD. BJX. COM. CN. Emergency! A crane vessel arm breaking accident occurred in a offshore wind power project in Guangdong [EB/OL]. (2020-09-14) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200914/1104212.shtml>.
- [17] 甘肃省应急管理厅. 武威民勤航天新能源投资股份有限公司发生一起事故 [EB/OL]. (2019-04-13) [2021-03-30]. http://yjgl.gansu.gov.cn/art/2019/4/13/art_211_9629.html.
Gansu Emergency Management Ministry. An accident occurred in Wuwei Minqin New Energy Investment Co., Ltd. [EB/OL]. (2019-04-13) [2021-03-30]. http://yjgl.gansu.gov.cn/art/2019/4/13/art_211_9629.html.
- [18] 国际能源网. 叶片折断!河南某风电场"5.04"三台风电机组叶片折断事件分析! [EB/OL]. (2020-06-19) [2021-03-30]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2292627.shtml>.
IN-EN. com. Blade broken! Analysis of "5.04" wind turbine blade breaking event in a wind farm in Henan! [EB/OL]. (2020-06-19) [2021-03-30]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2292627.shtml>.
- [19] 北极星风力发电网. 7月17日河北某风电场11号风机发生倒塔事故 [EB/OL]. (2020-08-05) [2021-03-30]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200805/1094624.shtml>.
FD. BJX. COM. CN. The No. 11 Fan of a wind farm in Hebei Province collapsed on July 17 [EB/OL]. (2020-08-05) [2021-03-30] <https://news.bjx.com.cn/html/20200805/1094624.shtml>.
- [20] 国际能源网. 无人员伤亡!维斯塔斯发生风电倒塔事故 [EB/OL]. (2020-11-24) [2021-03-30]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2298279.shtml>.
IN-EN. com. casualties! No Wind power tower collapse accident occurred in Vistas [EB/OL]. (2020-11-24) [2021-03-30]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2298279.shtml>.
- [21] 吴金城, 张容焱, 张秀芝. 海上风电机的抗台风设计 [J]. 中国工程科学, 2010, 12(11): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.005.
WU J C, ZHANG R Y, ZHANG X Z. Anti-typhoon design for offshore wind turbines [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12 (11): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.005.
- [22] 陈晓明, 王红梅, 刘燕星, 等. 海上风电环境影响评估及对策研究 [J]. 广东造船, 2010, 29(6): 26-31. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6622.2010.06.004.
ZHANG X M, WANG H M, LIU Y X, et al. Environmental impact assessment and countermeasures analysis of offshore wind powers [J]. Guangdong Shipbuilding, 2010, 29(6): 26-31. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6622.2010.06.004.
- [23] 吴佳梁, 李成峰. 海上风力发电机组设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
WU J L, LI C F. Design of offshore wind turbine [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [24] 王志新. 海上风力发电技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
WANG Z X, Offshore wind energy generation technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [25] 北极星风力发电网. 辽宁某风电场45号机组机舱着火事故调查报告 [EB/OL]. (2020-03-04) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200304/1050251.shtml>.
FD. BJX. COM. CN. Investigation report of wind turbine engine room fire accident of No. 45 unit in Liaoning [EB/OL]. (2020-03-04) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200304/1050251.shtml>.
- [26] 北极星风力发电网. 台风"天兔"来袭 红海湾风电场8台风电机组被拦腰截断 [EB/OL]. (2013-09-24) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20130924/461567.shtml>.
FD. BJX. COM. CN. Typhoon "Usutu" hit Hongwan wind farm 8 typhoon generator was cut off waist [EB/OL]. (2013-09-24) [2021-03-30]. <http://news.bjx.com.cn/html/20130924/461567.shtml>.
- [27] 人民网. 海南"威马逊"台风致使多家公司风机受损 [EB/OL]. (2014-07-22) [2021-03-30]. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0722/c71661-25315079.html>.
People. cn. Typhoon Rammasun in Hainan caused damage to

- wind turbines of many companies [EB/OL]. (2014-07-22) [2021-03-30]. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0722/c71661-25315079.html>.
- [28] 国际船舶网. 亚洲在建最大近海海上风电场爆燃 19 人跳海 [EB/OL]. (2017-07-15) [2021-03-30]. http://www.eworldship.com/html/2017/OperatingShip_0715/130086.html. Eworldship.com. The largest offshore wind farm under construction in Asia exploded and 19 people jumped into the sea [EB/OL]. (2017-07-15) [2021-03-30]. http://www.eworldship.com/html/2017/OperatingShip_0715/130086.html.
- [29] 国家能源局. 2020 年 8 月事故通报 [EB/OL]. (2020-11-02) [2021-03-30] http://www.nea.gov.cn/2020-11/02/c_139485392.htm. National Energy Administration. Accident notification in August 2020 [EB/OL]. (2020-11-02) [2021-03-30] http://www.nea.gov.cn/2020-11/02/c_139485392.htm.
- [30] 刘庆辉, 陆海强. 浅析海上风电施工安全管控 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(1): 128-132. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676. 2020. 01. 021. LIU Q H, LU H Q. Brief analysis on safety management and control of offshore wind farm construction [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1): 128-132. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676. 2020. 01. 021.
- [31] 胡安继. 附加载荷作用下工作绞车轴瓦失效研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. DOI: 10.7666/d.D01105257. HU A J. Research of winch bearing pads failure under additional loads [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. DOI: 10.7666/d.D01105257.
- [32] 韦承勋. 风—浪—流联合作用场数值模拟及其对圆柱构件的作用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. DOI: 10.7666/d.D238790. WEI C X. Numerical simulation of combined actions of wind, wave and current and their actions on cylindrical component [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. DOI: 10.7666/d.D238790.
- [33] 顾永宁, 胡志强, 谢彬, 等. 大型起重船波浪诱导吊索附加动力荷载研究 [J]. 中国海上油气, 2005(3): 197-202. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1506.2005.03.012. GU Y N, HU Z Q, XIE B, et al. Study on the additional dynamic load of lifting rope due to wave-induced motion of heavy crane barge [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005(3): 197-202. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1506.2005.03.012.
- [34] HO D, RANDALL R B. Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(5): 763-788.
- [35] 高端装备产业研究中心. 国内外海上风电安装船关键技术及市场研究报告 [R]. 北京: 高端装备产业研究中心, 2016. Sunvalley Frontier Equipment Industry Research Center. Key technology and market research report of domestic and foreign offshore wind power installation ship [R]. Beijing: Sunvalley Frontier Equipment Industry Research Center, 2016.
- [36] 孙广喜, 黄亚新. 海上风电场机组分体安装法及其应用 [J]. 中国工程科学, 2010, 12(11): 53-59+82. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.010. SUI G X, HUANG Y X. The split installation and application of offshore wind turbine generator systems [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12(11): 53-59+82. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.010.
- [37] 鲁阳. 海上风电系统故障预测与视情维修方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2018.000007. LU Y. Methodological study on fault prediction and condition based maintenance optimization for offshore wind turbine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2018.000007.
- [38] 魏书荣, 何之倬, 符杨, 等. 海上风电机组故障容错运行研究现状分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 145-154. DOI: 10.7667/PSPC151108. WEI S R, HE Z Z, FU Y, et al. Research status and prospect of offshore wind turbine fault tolerance [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 145-154. DOI: 10.7667/PSPC151108.
- [39] 孟凡成, 郭琦, 康宏伟, 等. 计及集中式和分布式新能源的电力系统连锁故障模拟 [J]. 高电压技术, 2022, 48(01): 189-201. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211277. MENG F C, GUO Q, KANG H W, et al. Cascading failure simulation for power system with utility-scale and distributed renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(01): 189-201. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211277.
- [40] 沈艳霞, 李帆. 风力发电系统故障诊断方法综述 [J]. 控制工程, 2013, 20(05): 789-795. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.2013.05.017. SHEN Y X, LI F. A survey of diagnosis methods for wind power system [J]. Control Engineering of China, 2013, 20(05): 789-795. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.2013.05.017.
- [41] 陈雪峰, 郭艳婕, 许才彬, 等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 175-189. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2020.02.004. CHEN X F, GUO Y J, XU C B, et al. Review of fault diagnosis and health monitoring for wind power equipment [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 175-189. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2020.02.004.
- [42] 熊中杰, 邱颖宁, 冯延晖, 等. 基于机器学习的风电机组变桨系统故障研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 85-90. XIONG Z J, QIU Y N, FENG Y H, et al. Fault analysis of wind turbine pitch system based on machine learning [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(5): 85-90.

- [43] YANG W, COURT R, JIANG J. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis [J]. Renewable Energy, 2013, 53(9): 365-376. DOI: 10.1016/j.renene.2012.11.030.
- [44] ZAHER A, MCARTHUR S D J, INFELD D G, et al. Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis [J]. Wind Energy, 2010, 12(6): 574-593.
- [45] CHEN B, QIU Y N, FENG Y, et al. Wind turbine SCADA alarm pattern recognition [C]//Institution of Engineering and Technology (IET). IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), Edinburgh, September 6-8, 2011. Edinburgh: IET, 2011:1-6. DOI: 10.1049/cp.2011.0164.
- [46] 刘建民. 海上风电运维技术的发展现状与展望 [J]. 风力发电, 2020(2): 43-49.
- LIU J M. Development status and prospect of offshore wind power operation and maintenance technology [J]. Wind Power, 2020(2): 43-49.
- [47] 江国乾. 基于排序模式分析与深度学习的风电设备故障诊断方法研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- JIANG G Q. Research on fault diagnosis methods for wind turbine based on ordinal pattern analysis and deep learning [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

作者简介:



初岳峰

1993-, 男, 山东烟台人, 资源与环境博士, 主要从事海上漂浮式风电研究 (e-mail) chuyf5@mail2.sysu.edu.cn。

初岳峰

郭志群 (通信作者)

1983-, 男, 回族, 福建莆田人, 副教授, 船舶与海洋工程博士, 主要从事海洋工程水动力研究 (e-mail) guozhq5@mail.sysu.edu.cn。

(责任编辑 叶筠英)

杂志荐书——《国际前沿技术发展研究》

著译者: 张振刚 余传鹏

编委会: 主任, 张振刚; 副主任, 周海涛、余传鹏; 委员, 高晓波、李云健、李牧南、赖朝安、林春培、罗泰晔、户安涛、叶宝升、陈一华、田帅、沈鹤。

版次: 第一版 开本: 16开

出版时间: 2021年1月第1版、2021年12月第3次印刷

出版单位: 华南理工大学出版社 标准书号: 978-7-5623-6593-8

【内容简介】本书是关于国际前沿技术发展的力作, 由作者团队历时五年精心打造。聚焦“IAB”(新一代信息技术、人工智能、生物医药)产业与“NEM”(新能源、新材料)产业, 共24个细分领域。本书作者团队用专利分析法等技术预见方法以及实证研究的方法, 综合专利信息、政策情报、科技论文等多样化数据来源, 深入剖析世界前沿技术的发展现状、关键领域、领先组织情况等, 并对各国前沿技术进行比较研究, 用大量详实的数据、丰富的图表、生动的案例来阐释研究结论, 体现了很强的学术性和可读性。本书将技术预见与产业生态、企业创新与技术经济深度融合, 又体现了高度的实践性和创新性。中国工程院院士、中国科学院院士、世界500强企业执行总裁联袂推荐。

【读者对象】政府科技管理部门干部、高校和科研院所科研工作者、科技管理人员、企业家和企业科技工作者, 以及所有对科技发展和科技公司发展前景感兴趣的人员。

【目录】第一章技术预见与技术预见方法; 第二章国际前沿技术发展现状与趋势; 第三章第五代移动通信技术(5G); 第四章超高清视频技术(4K/8K); 第五章区块链技术; 第六章量子信息技术; 第七章物联网技术; 第八章大数据技术; 第九章云计算技术; 第十章人工智能技术; 第十一章机器人技术; 第十二章3D打印技术; 第十三章第三代半导体技术; 第十四章芯片技术; 第十五章石墨烯技术; 第十六章清洁能源技术; 第十七章太阳能光伏技术; 第十八章特高压技术; 第十九章新能源汽车技术; 第二十章无人驾驶技术; 第二十一章精准医学技术; 第二十二章干细胞技术; 第二十三章高端医疗器械; 第二十四章疫苗与抗体技术; 第二十五章纳米医药技术; 第二十六章智慧医疗技术。广东省前沿科技发展对策建议; 特别说明。