



海上风电登靠步桥发展与关键技术研究综述

张彦方

Overview of offshore wind power gangway development and key technologies

ZHANG Yanfang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03516>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海上无人系统集群发展现状及关键技术研究进展

Research advances in the development status and key technology of unmanned marine vehicle swarm operation

中国舰船研究. 2021, 16(1): 7-17, 31 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02225>

海上无人装备关键技术与智能演进展望

Key technologies and intelligence evolution of maritime UV

中国舰船研究. 2018, 13(6): 1-8 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01293>

极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术研究进展

Research progress of anti-icing/deicing technologies for polar ships and offshore platforms

中国舰船研究. 2017, 12(1): 45-53 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3185.2017.01.008>

极低频发射系统关键技术的研究与实现

Key technologies study and implementation of extreme low frequency transmission system

中国舰船研究. 2021, 16(6): 116-123, 182 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02018>

核电平台连接机构设计与运动响应分析

Design of connecting mechanism and motion response analysis on nuclear power platform

中国舰船研究. 2020, 15(1): 152-161 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01786>

船舶自主航行关键技术研究现状与展望

State-of-the-art research and prospects of key technologies for ship autonomous navigation

中国舰船研究. 2021, 16(1): 32-44 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01958>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03516>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 张彦方. 海上风电登靠步桥发展与关键技术研究综述[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 48–58.

ZHANG Y F. Overview of offshore wind power gangway development and key technologies[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 48–58 (in Chinese).

海上风电登靠步桥发展与关键技术 研究综述



扫码阅读全文

张彦方*

中国铁建大桥工程局集团有限公司 船舶工程分公司, 天津 300308

摘要:海上风电登靠步桥的应用可确保海上风电风力涡轮机的正常运行, 能够为优化登靠操作、提高风电项目运维效率以及降低成本提供支持。从登靠步桥的发展历程以及技术进展的角度进行概述, 分析国内外在该领域的主要装备及其性能, 同时围绕运动感知与数据分析、补偿控制与执行、结构设计与可靠性以及新材料应用等方面对海上风电登靠步桥关键技术进行讨论。指出并联平台是主流的海上风电登靠步桥执行机构, 波浪补偿是设备性能的核心以及竞争力来源, 先进的波浪补偿技术有赖于传感器技术、人工智能等多学科的发展。分析结果可为海上风电登靠步桥领域的后续技术探索提供参考。

关键词:海上风电; 海上登靠步桥; Stewart平台; 波浪补偿; 运动预报

中图分类号: U664.4

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03516

Overview of offshore wind power gangway development and key technologies

ZHANG Yanfang*

Shipbuilding Engineering Branch, China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Corporation,
Tianjin 300308, China

Abstract: The application of offshore wind power gangways ensures the normal operation of offshore wind turbines and provides reliable support for optimizing the boarding process, improving the operation and maintenance efficiency, and reducing the cost of wind power projects. This paper provides an overview of the development history and technological progress of gangways, and analyzes the main equipment in this field and its performance at home and abroad, as well as discussing the key technologies of offshore wind turbine gangways in such aspects as motion sensing and data analysis, compensation control and execution, structural design and reliability, and composite material application. It is pointed out that the parallel platform is the mainstream offshore gangway actuator; wave compensation is the core of equipment performance and the source of competitiveness; and advanced wave compensation technology depends on the development of sensor technology, artificial intelligence technology and other multidisciplinary development. This paper makes a comprehensive analysis for researchers and practitioners in the field of offshore wind power gangways, providing valuable references for subsequent technology exploration.

Key words: offshore wind power; offshore gangway; Stewart platform; wave compensation; motion prediction

0 引言

海上风电是实现能源转型和碳中和的重要载体, 发展潜力巨大^[1-2]。2021年, 全球新增风电容量93.6 GW^[3]。随着全球海上风电场建设和运营数量的快速增长, 对海上人员和货物安全转设

备的需求不断增加。据统计, 在海上风力发电机生命周期中, 运营和维护服务成本预计占总成本的30%以上^[4]。海上风电机组的建造、调试、测试和维护都需要大量的人力投入, 但海上天气多变, 海上设备转移作业时常遇大风浪、暴雨和大雾天气, 导致能见度低, 海况差, 从而对人员安全

收稿日期: 2023-08-18

修回日期: 2024-01-09

网络首发时间: 2024-04-15 20:22

作者简介: 张彦方, 男, 1972年生, 高级工程师

*通信作者: 张彦方

造成极大威胁,容易引发安全事故。为了保证稳定、安全、有效的海上转运,采用海上登靠步桥可以抵消船舶的多维运动,使转运物体在惯性空间中保持稳定^[5-6]。

国外公司开发了一系列稳定性强、适应不同海况的登靠步桥设备。这些产品在海上风电场维护中发挥着关键作用,为安全高效的人员转移提供了可靠解决方案。近年来,国内企业和研究人员也开始在该领域展开积极探索^[7],相继推出了搭载国产海上登靠步桥的各型船只,打破了国外设备在该领域的垄断地位。

目前海上风电运维领域正迅速演变,注重可靠性、安全性和可持续性。提倡采用远程监测和自动化技术,以实现实时状态监测和问题诊断,最大程度减少人员在海上的工作时间^[8]。在海上风电登靠步桥的设计上,需考虑稳定性、耐用性以及应对恶劣海况的能力,同时要确保安全栏杆、防滑表面和紧急撤离装置的设置。

本文拟对海上风电登靠步桥的发展历程进行综述,并从运动感知与数据分析、补偿控制与执行、结构设计和可靠性以及新材料应用这 4 个方面,梳理关键技术发展脉络,预测未来发展趋势。

1 海上风电登靠步桥发展概述

船舶转运人员和物资时主要受到温度、湿度、海风、波浪等因素的影响,这些因素中波浪的影响是最大的,主要有 6 个自由度方向上的影响^[9],分别为横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡。其中,横纵方向上的波浪运动对船舶的影响最为明显^[10],主要表现在:1)船舶在水平方向上的运动会使得船舶偏离登靠目标,增大登靠难度;2)船舶在升沉方向上的运动会使得船上的工作人员无法站立平稳,增大安全事故发生率;3)船舶的六自由度运动都会在一定程度上增加登靠步桥以及物资与海洋结构发生碰撞的风险。因此,海上登靠步桥的设计总体围绕着减小波浪对登靠系统的影响展开^[11]。

1.1 海上登靠方式

目前,海上登靠方式有以下几种:1)对接沿海风机爬梯的快速登靠方式;2)对接风机平台的登靠方式;3)用于大型货物转运的起重设备;4)其他设备和登靠方式^[12]。其中效率最高、应用最广泛的是第 1 种登靠方式,其依赖两种登靠船舶来完成。一种是不带运动补偿系统的登靠船舶,这类船舶只能在海况较好时进行作业。另一种是带

有运动补偿海上登靠步桥的船舶,图 1 展示了其搭载的海上登靠步桥以及 3 个自由度。这类船舶的优势是能够在恶劣海况下运行,可补偿的海浪波高可达 4 m^[13-14]。

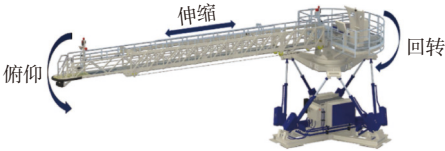


图 1 海上登靠步桥的 3 个自由度
Fig. 1 Three degrees of freedom of the offshore gangway

1.2 海上风电登靠步桥发展历程

早期作业人员通过双体船搭载小型登离舷梯通往离岸设施的入口通道,但是小型登离舷梯的承载能力较小,并且安全性和稳定性一般,只能应对波高 0.5~2.0 m 的工作环境,难以满足恶劣海况下的作业需求。广州船舶与海洋工程设计研究院自主研发的三自由度主动补偿登离舷梯^[15]是典型的小型登离舷梯装备。如图 2 所示,该舷梯最大伸长尺度 5 m,额定载荷 175 kg,可在四级海况将作业人员安全送往风电塔,该装备适应性强、作业范围广泛。Maxccess 公司研发的抱桩式登靠步桥也是典型的小型海上登靠装备,图 3 为其人员转移场景。该登靠步桥通过舷梯顶端的夹爪与海上设施保持连接,增强稳定性,可满足人员转移以及轻型货物运输的需求。



图 2 广船院小型登离舷梯
Fig. 2 Small offshore gangway of GSERI



图 3 Maxccess 公司小型登离舷梯
Fig. 3 Maxccess small offshore gangway

随着海洋工程的不断发展,人员逐渐由近海转移到深海进行作业。因此,需要开发一种具有多自由度波浪补偿功能的大型海上登靠步桥,实现人员和货物的安全转移,并且能够提供强大的承载能力。

2015 年,荷兰 Safeway 公司推出了离线登靠系统,解决了在恶劣海况下的登靠难题,大大提高了作业的安全性和效率^[16]。此后该公司陆续推出 Seagull, Osprey 和 Gannet 三种型号的产品,均采用串并联相结合的补偿方案,主要目的是使登靠步桥具有较大的垂直提升距离,使伸缩舷梯在登靠作业时尽量保持水平,图 4 所示为 Seagull 型登靠步桥搭接海上风机的情景。这种设计提高了登靠步桥对安装母船的适应性和人员转运时的安全性,满足未来多场景使用的需求。2021 年,该公司对 Gannet 型登靠步桥进行了全电化改造,进一步提升了设备的操作灵活性并降低功耗。



图 4 Seagull 型海上登靠步桥
Fig. 4 Seagull offshore gangway

2016 年, Barge Master 公司推出了运动补偿海上登靠步桥,如图 5 所示。该型登靠步桥为并联补偿方案,依靠伸缩舷梯的俯仰运动进行搭接和垂直提升,由于其倾斜的登靠方式,为提升人员行进安全性,舷梯采取了专门的防滑措施^[17]。该登靠步桥拥有吊运功能,在不运输人员的情况下可以当做起重机使用,系统有效载荷为 800 kg,同样满足大型海上登靠步桥的大承载需求。

主动式波浪补偿具有响应速度快、补偿能力强的优点,但设备功率大。许多公司针对温和海况作业需求,开发了被动补偿或主被动两用的登靠步桥。Safeway 公司的 Osprey 型登靠步桥在主动波浪补偿时功耗为 100 kW,被动补偿时仅为 30 kW。KenzFiguee 公司于 2016 年推出了如图 6 所示的纯被动补偿式登靠步桥。该登靠步桥可以

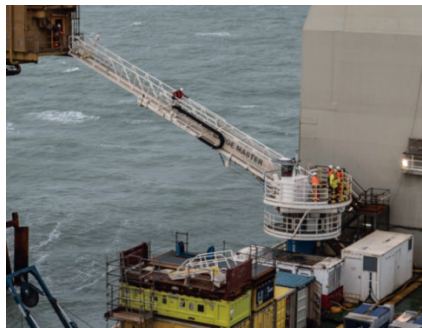


图 5 Barge Master 公司的海上登靠步桥
Fig. 5 Barge Master's offshore gangway



图 6 KenzFiguee 公司的被动运动补偿登靠步桥

Fig. 6 KenzFiguee's passive motion-compensated offshore gangway
根据实际需求更改舷梯的尺寸,同样满足货物吊运的要求,有效载荷高达 1 500 kg^[18]。

荷兰 SMST 公司致力于提供各种伸缩登靠步桥,拥有 S, M, L 和 XL 四种型号,长度为 4~58 m 不等。针对早年海上登靠步桥存在的登靠安全性等问题,该公司采用了模块化设计,将垂直堆叠模块、调高系统与波浪补偿登靠步桥串联起来,实现了人员登靠作业时水平行进,同时波浪补偿系统可选择主动或被动运动补偿。图 7 为 SMST 公司登靠步桥的 3 种布置方式,图 8 展示了该登靠步桥的搭接效果^[19]。



(a) 固定设置 (b) 与堆叠模块共同安装 (c) 与调高系统共同安装

图 7 3 种布置方式

Fig. 7 Three types of arrangement



图 8 登靠步桥与海上风机搭接效果^[19]

Fig. 8 Effect of lap joint with offshore wind turbine^[19]

2021 年, Ampelmann 公司提供的大型海上登靠步桥首次应用于国内运维船舶^[20-21],该型登靠步桥具备六自由度波浪补偿能力。Ampelmann 公司

提供了一系列的海上登靠产品, 涵盖电液混合驱动型、纯电驱型、重载型以及极地适用型等。执行机构可分为并联式、串联式和串并联组合式。串联机构虽然在载荷以及响应时间上逊色于并联机构, 但其具有占地面积小、系统集成度高等优点。图 9 为该公司 B 型海上登靠步桥, 采用并联结构。图 10 为 W 型海上登靠步桥, 采用串联结构。



图 9 Ampelmann 公司 B 型海上登靠步桥
Fig. 9 Ampelmann's offshore gangway type B



图 10 Ampelmann 公司 W 型海上登靠步桥
Fig. 10 Ampelmann's offshore gangway type W

此外, Tectrans 公司设计的 FlexBridge 海上登靠系统进一步增强了灵活性和可扩展性, 减少了重量长度比, 适合节能运动补偿。

我们对比了国外数十款海上登靠步桥产品, 认为海上登靠设置的发展趋势, 以提高波浪补偿精度和安全性为主。此外, 表 1 列出的多用途、节能化等也是目前国际上海上登靠设备主流发展趋势, 这也为海上登靠设备的未来发展提供了有益参考。

表 1 海上登靠步桥发展趋势

Table 1 Trends in the development of offshore gangways					
发展方向	典型产品	舷梯长度/m	补偿有义波高/m	转移货物极限重量/kg	其他特点
恶劣海况	Ampelmann公司E型	30	4.5	100 000	适用于船长大于70 m的船舶
重载作业	Ampelmann公司F型	21	2.5	33 000~51 000	目前载重最大的登靠步桥
长臂展	SMST公司XL型	28~58	2.5		被动补偿
	Tectrans公司F型	18~42	2.5		特殊应用可以达到80~100 m
多用途	Safeway公司Osprey型	32	3.0	1 000	回转范围240°, 垂直提升能力12 m
	SMST公司M型	13~21	3.0	1 000	适用于多种类型母船
快速响应	SMST公司S型	4~12	3.0		
	Ampelmann公司L型	13	2.0	8 000	适用于人员快速转移
极地作业	Ampelmann公司N型	32	3.5		可承受-40 ℃的低温
节能化	Safeway公司Seagull型	28	3.5	1 000	最大功耗85/25 kW(主动/被动)
	Ampelmann公司S型	26	3.0	25 000	全电驱动

2 海上登靠步桥关键技术研究

随着海上风电开发向深远海不断拓展, 对风电运维船舶和海上登靠步桥的技术要求不断提高^[22]。本文将对主要的几种关键技术进行概述。

2.1 运动感知与数据分析

2.1.1 环境监测与数据采集

在海上登靠步桥设计中, 环境监测与数据采集紧密结合, 为登靠步桥的安全性、稳定性和可操作性提供了基础支持。船体在波浪中的多自由度运动姿态采集主要依靠惯性传感器, 内置的陀螺仪和加速度计输出翻滚角、俯仰角、偏航角、加速度信息等^[23]。目前姿态定位传感器可以满足

0.2°的纵倾和横滚运动分辨率以及 0.25 mg 的加速度分辨率需求, 最高输出频率可达 2 kHz。

除使用惯性传感器获取船舶位姿外, 研究人员还采用风速传感器、波浪传感器等获取实时海况信息, 并结合气象数据进行分析, 预测海况变化。这些数据为操作人员提供了实时的环境感知信息, 辅助进行操作决策, 降低操作风险。现阶段, 我国中高端力敏类、化学类传感器进口占比仍在 80% 左右, 国内传感器的可靠性指标亟待加强, 同时也需要在技术细分下建立统一的标准, 以提高产品互换性。

2.1.2 数据预处理

惯性传感器工作时会产生噪声, 包括随机噪声、偏差噪声、脉冲噪声、高频噪声等^[24]。为了降

低这些噪声对数据的影响,常常采用信号处理技术、信号校准技术以及噪声滤波器来处理传感器数据。其中,卡尔曼滤波是一种经典的状态估计方法,适用于对动态系统中存在噪声和不确定性的状态进行估计和预测^[25-26]。研究人员通过动态调整估计值和测量值之间的权重,结合系统的动态模型和测量数据,通过迭代更新状态估计值,完成采集信息的处理^[27-28]。

奔粤阳等^[29]针对波浪信息校准提出了一种自适应运动姿态参考系统。利用船舶升沉加速度 $\dot{y}_z^d$ 和海浪的主导频率 ω_p 推算海浪运动的平均高度 A 。基于海浪主导频率、平均高度和传感器的噪声方差 σ^2 计算升沉滤波器的截止频率 ω_c^{opt} 。通过波浪滤波器对船舶的粗糙波浪加速度进行过滤,获得样本点的波浪位移信息。这种方法不仅能够测量波浪运动的平均高度,还能够计算波的主频率,为后续船舶运动预测提供支持。

$$A = \sqrt{\frac{2}{k} \sum_{m=0}^k \frac{[\dot{y}_z^d(m)]^2}{\omega_p^4}} \quad (1)$$

$$\omega_c^{\text{opt}} = \frac{1}{2^{3/2}} \left(\frac{3\sigma^2 \omega_p^2}{A^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

2.1.3 运动模型

准确的位姿数据主要为船体及登靠步桥运动建模提供支撑,该研究分为两部分:一是海上登靠步桥运动响应分析及其在步桥设计与操作中的应用;二是通过数学模型准确描述海上登靠步桥在海浪、风等动力载荷作用下的运动特性^[30-31]。

在运动响应研究方面, Li 等^[32-33]通过时域数值模拟,并对比实验测量值,分析了多体系统的水动力相互作用; Qiu 等^[34]通过建立动力学模型揭示了舷梯带来的非对称载荷对混合式海上登靠步桥支撑链牵引力的影响; Huang 等^[35]利用数值方法研究了转塔系泊浮式生产储卸油(FPSO)装置和半潜式调节平台(AP)的耦合动力学和舷梯响应。以上研究都在不同程度上强调了海况和动力载荷对登靠步桥的影响。

在数学建模方面, D-H 矩阵参数法是常用的建模方法^[36-38]。在海上登靠步桥的各个关节建立坐标系,通过矩阵变换表述相邻关节之间的空间位姿关系,最终得到串联结构的运动学方程^[39]。无论是串联机构还是并联机构,都需要计算系统的运动补偿量,来对执行机构下达补偿指令。林泽等^[40]针对海上舷梯末端点位置镇定控制问题,通过运动学反解,计算出补偿海浪引起的船舶摇晃运动对舷梯末端点位置的扰动,进而得出舷梯

关节期望位置。串联式运动补偿登靠步桥一般级数在 4 级以内,运动补偿量易于通过类似的运动学反解直接得到^[41-42],对于使用并联平台的海上登靠步桥,由于运动更为复杂且受到多方面的限制,在对整个结构进行分析时可以辅以动力学建模^[43-44],将平台与各个连杆作为两个子系统,分析其动能与势能。

2.1.4 运动预测

由于信号采集和处理以及电液系统执行等环节带来的时滞,波浪补偿系统在进行运动补偿时往往存在滞后性,面对不规则波时尤为明显。因此,对船舶运动及姿态进行预测就显得十分重要。

Zhang 等^[45]提出了一种新的神经网络(LSTM)预测模型,该预测模型基于自适应动态粒子群优化算法(ADPSO)和双向长短期记忆(BiLSTM)神经网络,通过自适应调整学习因子来平衡全局和局部搜索能力,从而提高优化性能,改善其在 BiLSTM 参数优化过程中的优化效果。夏骏达^[46]设计了基于经验模式分解和长短期记忆神经网络(EMD-LSTM)的组合预测模型,对船舶位姿进行极短期预测,仿真结果验证了其预测精度优于单一的预测模型。张新宇等^[47]针对系统的大惯量、高负载和强干扰等因素导致波浪补偿系统响应滞后问题,提出了一种基于回声状态网络(ESN)的海浪预报方法,并与基于 AR 模型和反馈型神经网络(ELMAN)的方法在预报精度和预报响应时间方面进行对比。

在海上登靠步桥研究中,运动感知和数据感知起着关键作用。通过环境监测和数据采集,实时获取船舶运动和海况信息,为步桥安全性、稳定性和操作性提供基础。LSTM 网络可以使用历史位姿数据和其他相关信息,如海浪、风力等数据作为输入,学习数据之间的关系,并预测未来的位姿。运动预测进一步优化了步桥运动补偿和控制系统,提高了执行动作的智能性和安全性。

2.2 补偿控制与执行

2.2.1 运动补偿策略

波浪补偿系统按照补偿方式可分为被动补偿、半主动补偿和主动补偿,表 2 对比了各补偿方式的特点和适用情景。被动补偿主要依靠结构设计或机械系统本身会通过物理特性来减小波浪引起的运动,核心是采用液压复合油缸或者气体蓄能器作为储能装置。由于蓄能器的体积限制以及补偿范围较小,单纯的被动补偿仅适合在较为温和的海况下运行^[48]。半主动补偿是被动补偿和主动补偿的结合,在被动补偿系统承担平台静

载荷的基础上,使用主动补偿油缸来进行实时位移补偿,以达到更好的位移补偿效果^[11,49-50]。但其抗干扰性以及补偿精度、适应性仍然不强,目前主要应用在重载打捞船上,在海上登靠步桥领域应用较少^[51]。主动补偿系统集成检测、控制和执行于一体,具有补偿精度高、可靠性好、抗干扰能力强的优点,是首选的海上登靠步桥补偿方式^[52]。

表 2 波浪补偿系统分类

Table 2 Classification of wave compensation systems

系统类型	运动补偿结构	补偿精度	适用海况
被动补偿	机械储能结构	低	温和
半主动补偿	储能+液压结构	中	中等
主动补偿	电液补偿结构	高	恶劣

2.2.2 控制算法

控制算法的设计涉及对动态系统的建模、控制器设计和参数调整,以实现步桥的精准运动补偿。针对运动补偿中常用的 Euler-Lagrange 系统输入时滞问题,Roy 等^[53]提出了自适应鲁棒控制策略。针对 Stewart 平台运动补偿与实际运动不同步的问题,Tajdari 等^[54]通过线性二次积分控制器解决了输入的滞后性。另一种方法是设计鲁棒控制器,将预补偿输入延迟集成在控制器中,以实现一致最终有界性(UUB)^[55]。Yin 等^[56]针对风电运维船的纵荡、横荡和偏航运动的低频响应,在时域内考虑了风电运维船与主动并联平台的耦合,通过求解康明斯方程得到风电运维船的运动响应,并得出了一种快速求解算法。Cai 等^[57]通过反馈技术将新型速度前馈补偿器与滑模控制器结合起来,将神经网络集成到自适应控制器中,以估计船舶运动引起的参数变化,从而调整控制器参数以补偿误差。

比例-积分-微分控制(proportional integral derivative, PID)和比例-微分控制(proportional derivative, PD)算法是应用最广泛的波浪补偿控制算法之一,PD 算法基于误差和误差变化的比例和导数来调整控制输入,适用于快速响应和抑制振荡。在波浪补偿中,PD 控制可以快速响应船舶运动,减小补偿延迟,从而更好地抑制运动^[58]。PID 算法在 PD 的基础上增加了积分项,用于消除稳态误差,即系统长时间存在的小误差^[59]。因此在波浪补偿中,PID 控制能够更准确地跟踪和控制系统的目标值,提高系统的稳定性和精度^[60]。PID 和 PD 算法在控制系统中具有简单、实时等优势,对于简单、线性且稳定的系统表现良好。然而,在处理复杂、非线性系统和时滞问题时存在限制。朱传同等^[61]提出模糊自适应 PID 同等耦

合同步控制算法,实现阀控非对称液压缸的同步控制。通过同步误差和其微分量对 PID 的 3 个控制参数进行在线修改,较好地解决了液压系统非线性参数时变的问题。引入先进的控制算法如模型预测控制(MPC)^[62],能够提高时变系统存在非线性输入以及约束条件时的控制精度。此外,利用遗传算法^[63-65]、粒子群算法^[66-68]优化也可以在非线性输入、多目标系统以及鲁棒性等方面优化 PID 控制。

2.2.3 运动补偿执行器设计

海上登靠步桥的运动补偿执行机构有串联机构、并联机构和串并联结合机构 3 种。串联结构海上登靠步桥通常是由一系列的伸缩臂构成。这些伸缩臂可以根据船舶与平台的相对位置进行伸缩,从而实现登靠操作。与串联机构相比,并联机构通常具有更短的响应时间和更强的稳定性,总体上具有较高的负载能力^[69-70]。Stewart 平台为海上登靠步桥领域典型的并联机构,该平台是一种六自由度并联机构,它可以实现在 6 个方向上的运动补偿。多数知名海上登靠装备生产商如荷兰 Ampelmann 公司、英国的 OSBIT Power 公司和挪威 UPTIME 公司等都推出了采用 Stewart 平台的主动补偿海上登靠步桥。

Niu 等^[71]认为使用 Stewart 平台作为运动补偿器所需的安装空间较大且在机械结构上有些浪费,因此设计了一种新型串并联混合登靠步桥,由三自由度空间对称结构(3UPU/UP)的并联平台和三关节机械臂结构(RRP)的串联舷梯组成。该设计方案符合海上登靠步桥节能化趋势,但能够补偿的有义波高较低,因此仅适合安装在小型服务运营船(SOV)上。但串联 RRP 结构舷梯方案值得借鉴,对于较小的平台或紧凑的安装空间,串并联结合的设计是一种有效的解决方案。并联 Stewart 平台目前仍是针对船舶纵倾、横摇运动的基础性补偿机构^[72-74],而串联多自由度舷梯有利于拓展整体运动范围,提供更全面的运动补偿效果。该方案在海上登靠步桥领域属于较新的探索方向,有望为提高海上登靠步桥性能提供新的解决方案。

2.3 结构设计和可靠性

海上登靠步桥的设计中,强度和结构稳定性是关键的因素,对确保步桥结构的安全性、可靠性和持久性具有重要意义。研究人员通过运用先进的结构分析、材料测试和数值模拟技术,揭示步桥在复杂环境下的受力情况,并制定优化的结构设计和改进措施。

登靠步桥的结构和可靠性分析涉及多种工具和方法: 1) 静力学分析用于研究结构的强度和稳定性; 2) 计算流体力学(CFD)分析用于模拟海风等因素对登靠步桥的影响; 3) 多体动力学分析用于模拟海浪、负载和船舶运动等因素作用下登靠步桥的动态响应; 4) 模态分析用于研究结构的固有振动特性, 评估共振和模态失稳现象。上述方法典型的商用分析软件有 ANSYS, OpenFOAM, ADAMS 和 MSC Nastran 等, 同时也有一些研究人员采用自行开发的分析工具。综合应用以上工具和方法能够全面评估登靠步桥的结构性能。

Korakas^[75]研究了海上登靠步桥钢桁架结构中偏心节点对结构屈曲行为的影响, 提出了用于分析含偏心关节的桁架结构的非对称的刚度矩阵。王宸等^[76]基于 ANSYS 有限元分析软件, 对海上登靠步桥固定梯和活动梯强度校核问题, 比较了多点约束法、重叠网格法和两梯分离方法, 分析过程遵循挪威船级社规范^[77]。

在海上登靠步桥设计中, 连接部位、伸缩机构、支撑结构以及连接管道和液压系统是面临较大强度和疲劳风险的关键部位^[78-80]。可采用以下措施来确保登靠步桥在极端海上环境中的安全性和可靠性: 1) 充分考虑波浪、潮汐、风力和人员装备换乘等载荷; 2) 采用高强度、耐腐蚀的材料和防护涂层延长结构寿命; 3) 通过先进的结构分析技术对关键部位进行强度校核和抗疲劳分析; 4) 遵循国际、国内规范, 定期进行结构检测和维护。

2.4 新材料应用

选择适当的材料对于海上登靠步桥的设计和性能至关重要。材料选择必须考虑环境适应性, 包括海水的腐蚀、气候条件和盐雾等因素。材料的强度应足以支撑设备和人员的负荷。目前的海上登靠步桥仍以钢结构为主, 但一些船级社已将铝合金材料纳入海工结构制造规范。此外, 钛铝合金、镁合金等轻量化材料也在研究人员的研究范围内^[81]。

近年来, 复合材料以其轻质、高强度、优异的耐腐蚀性和设计灵活性吸引了许多研究人员的关注。郑传祥等^[82]提出了可使用纤维增强树脂复合材料将海上平台的海水飞溅区的承载基础包覆隔离, 该设计提高了钢结构整体耐腐蚀性、延长了整体使用寿命。复合材料在减轻步桥设备的整体重量, 改善海上登靠步桥设备的性能和可靠性方面拥有巨大潜力, 但由于成本及工艺的原因, 目前在海洋工程结构领域应用的尝试和研究仍然较少。

3 结论与展望

近年来的研究不断推动着海上风电登靠步桥领域的发展, 取得了显著成果。从波浪补偿技术的角度来看, 不同的结构设计和控制策略的采用, 如 Stewart 平台、串并联结合设计、PID 控制、预测控制、滑模控制等, 已经在实际应用中得到了广泛的验证。通过这些方法, 海上登靠步桥可以更好地适应海洋环境的复杂波浪条件, 实现稳定的登靠操作, 提高作业效率和安全性。

然而, 海上风电登靠步桥需要在恶劣环境下作业, 在不同海况下保持稳定仍然是一项挑战。同时, 为了确保安全登靠, 材料的选择以及自动对准和对接技术还需要进一步的突破。首先, 需要更深入的研究来优化步桥的设计和控制策略。其次, 输入延迟等因素可能影响步桥的性能, 需要进一步研究延迟补偿技术, 以提高步桥的稳定性和作业精度。最后, 与人工智能、机器学习等技术的融合, 有望为海上风电登靠步桥控制带来更大发展。

参考文献:

- [1] CHEN G L, YU W D, LI Q C, et al. Dynamic modeling and performance analysis of the 3-PRRU 1T2R parallel manipulator without parasitic motion[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 90(1): 339–353.
- [2] YAN M W, MA X, BAI W, et al. Numerical simulation of wave interaction with payloads of different postures using OpenFOAM[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(6): 433.
- [3] GWEC. Total global new wind power installations in 2021[R/OL]. (2022-04-06)[2023-07-01]. <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.
- [4] STEHLY T, DUFFY P, MULAS HERNANDO D. 2022 Cost of wind energy review [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2023: 24–43.
- [5] CAI Y F, ZHENG S T, LIU W T, et al. Adaptive robust dual-loop control scheme of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 164: 104406.
- [6] QUAN W C, LIU Y S, ZHANG Z Y, et al. Scale model test of a semi-active heave compensation system for deep-sea tethered ROVs[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 126: 353–363.
- [7] 国际船舶网. 振华重工自主研发 46 米可伸缩式登船栈桥项目发运 [EB/OL]. (2020-06-23)[2023-07-01]. http://www.eworldship.com/html/2020/Manufacturer_0623/160929.html.

developed 46-meter retractable ship boarding trestle project shipment[EB/OL]. (2020-06-23)[2023-07-01]. http://www.eworldship.com/html/2020/Manufacturer_0623/160929.html (in Chinese).

[8] 范多虎. 风电运维管理模式的探讨与讨论 [J]. 中国设备工程, 2022(20): 56–58.

FAN D H. Exploration and discussion of wind power operation and maintenance management models[J]. China Plant Engineering, 2022(20): 56–58 (in Chinese).

[9] 王鑫, 崔亚昆, 薛海波, 等. 国内外海上风电平台运维登靠系统概况 [J]. 科技与创新, 2019(20): 55–58.

WANG X, CUI Y K, XUE H B, et al. Overview of domestic and international offshore wind power platform operation and maintenance boarding system[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(20): 55–58 (in Chinese).

[10] 刘鹏, 周利, 刘仁伟, 等. 用于船舶主动式升沉补偿的自抗扰控制方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(22): 83–88.

LIU P, ZHOU L, LIU R W, et al. Research on ADRC applied to active heave compensation control system for ship[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(22): 83–88 (in Chinese).

[11] 展勇, 吴少飞, 付钧升, 等. 半主动升沉补偿系统的非线性建模与仿真 [J]. 液压与气动, 2021, 45(11): 86–93.

ZHAN Y, WU S F, FU J S, et al. Nonlinear modeling and simulation of semi-active heave compensation system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(11): 86–93 (in Chinese).

[12] 陈铭. 基于毫米波雷达的海上风电机位平台运维船舶登靠安全判断方法 [J]. 船舶工程, 2021, 43(增刊 1): 104–106,109.

CHEN M. Judgment method of safety landing of operation and maintenance ship for offshore wind farm platform based on millimeter wave radar[J]. Ship Engineering, 2021, 43(Supp 1): 104–106,109 (in Chinese).

[13] 孙鲁闽, 顾炳, 余德全. 基于波浪补偿技术的新型海上换乘装置研究 [J]. 机电设备, 2009, 26(3): 8–11, 26.

SUN L M, GU B, YU D Q. Study on new type of offshore transfer equipment based on wave compensation technology[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2009, 26(3): 8–11, 26. (in Chinese)

[14] 倪健, 曹保根, 邵壮超. 海上伤病员换乘装置自动化及信息化改进初探 [J]. 海军医学杂志, 2009, 30(3): 233–234.

NI J, CAO B G, SHAO Z C. A preliminary study on the automation and informationization improvement of the sea casualty and sick transfer device[J]. Journal of Navy Medicine, 2009, 30(3): 233–234 (in Chinese).

[15] 广船院. 广船院推出海上风电塔登乘栈桥填补国内海上登靠装备配套空白 [J]. 广东造船, 2017, 36(5): 96.

GSSC. GSSI launches offshore wind power tower gangway to fill the gap of domestic offshore equipments[J]. Guangdong Shipbuilding, 2017, 36(5): 96 (in Chinese).

[16] VAN AALST. Introduction to the saweway offshore docking gangway[EB/OL]. [2023-07-01]. <http://www.vanaalstmarine.com>.

[17] Barge Master. Introduction to the barge master offshore docking gangway[EB/OL]. [2023-07-01]. <https://www.barge-master.com/products/bm-gangway>.

[18] KENZ FIGEE. Introduction to the Kenzfigee offshore docking gangway[EB/OL]. [2023-07-01]. <https://www.kenzfigee.com/wp-content/uploads/2021/05/161219-brochure-gangway-verkl.pdf>.

[19] SMST.Gangways[EB/OL].[2023-07-01].<https://www.smst-equipment.com/offshore-access/gangways/>.

[20] AMPELMANN. Introduction to the ampelmann marine docking gangway[EB/OL]. [2023-07-01]. <https://www.ampelmann.nl/offshore-wind>.

[21] 国际船舶网. 国内风电运维母船首次引进六自由度波浪补偿舷梯 [EB/OL]. (2021-09-24)[2023-07-01]. http://www.eworldship.com/html/2021/Manufacturer_0924/175107.html.

Eworldship.com.Six-degree-of-freedomwave-compensated gangway introduced for the first time on a domestic wind power operation and maintenance ship [EB/OL]. (2021-09-24)[2023-07-01]. http://www.eworldship.com/html/2021/nufacturer_0924/175107.html (in Chinese).

[22] 刘岚, 吴垠峰, 秦小健, 等. 海上风电运维的技术现状及发展趋势 [J]. 中国水运 (下半月), 2022, 22(12): 47–49.

LIU L, WU Y F, QIN X J, et al. Technical status and development trend of offshore wind power operation and maintenance[J]. China Water Transport, 2022, 22(12): 47–49 (in Chinese).

[23] BRYNE T H, FOSSEN T I, JOHANSEN T A. Design of inertial navigation systems for marine craft with adaptive wave filtering aided by triple-redundant sensor packages [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(4): 522–544.

[24] 韩颖. 基于卡尔曼滤波的 MEMS 陀螺噪声抑制算法设计与实现 [J]. 电子测试, 2021(19): 51–53, 40.

HAN Y. Design and implementation of noise suppression algorithm for MEMS gyroscope based on Kalman filter[J]. Electronic Test, 2021(19): 51–53, 40. (in Chinese).

[25] 王帅洋, 杨宣访, 胡致远, 等. 基于改进无迹卡尔曼滤波的动力定位系统状态估计 [J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 102–109, 178.

WANG S Y, YANG X F, HU Z Y, et al. State estimation of the dynamic positioning system based on the improved unscented Kalman filter[J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 102–109, 178 (in Chinese).

[26] 孔令哲. 基于卡尔曼滤波法的船载惯性测量单元设计

- [J]. *空间电子技术*, 2021, 18(4): 33–38.
- KONG L Z. Design of ship-borne inertial measurement unit based on Kalman filtering[J]. *Space Electronic Technology*, 2021, 18(4): 33–38 (in Chinese).
- [27] 马涛, 朱红, 李群, 等. 一种基于惯性技术的相对姿态测量方法: 107796388-A[P]. 2018-06-22.
- MAO T, ZHU H, LI Q, et al. Inertia technology based ship posture measuring method, involves calculating observation value of observation matrix, obtaining parameters of state quantity by Kalman filter, and obtaining measured attitude values: 107796388-A[P]. 2018-06-22 (in Chinese).
- [28] 赵威. 一种两船相对运动状态实时测算方法: 115016504-A[P]. 2022-09-30.
- ZHAO W. Real-time measuring method for relative movement state of two ships, involves performing measurement fusion and filter observation treatment on ship movement state based on Kalman filter algorithm: 115016504-A [P]. 2022-09-30 (in Chinese).
- [29] 奔粤阳, 高倩倩, 赵玉新, 等. 一种自适应的运动姿态参考系统升沉测量方法: 110319838-A[P]. 2019-11-04.
- BEN E Y, GAO Q Q, ZHAO Y X, et al. Self-adaptive motion attitude reference system heave measurement method, involves constructing direction cosine matrix of motion pose reference system, and decomposing acceleration information into semi-fixed coordinate system: 110319838-A[P]. 2019-11-04 (in Chinese).
- [30] DONG Q, GUO X X, LI X, et al. Coupled dynamics between a turret-moored FPSO and a semi-submersible accommodation platform[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 229: 108764.
- [31] 李二伟, 赵铁石, 王唱, 等. 海上运动补偿混联舷梯的机构学建模 [J]. *船舶工程*, 2018, 40(11): 66–72.
- LI E W, ZHAO T S, WANG C, et al. Mechanism modeling of sea motion compensated hybrid gangway[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(11): 66–72 (in Chinese).
- [32] LI B B. Operability study of walk-to-work for floating wind turbine and service operation vessel in the time domain[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108397.
- [33] LI B B, LIANG H, CHEN X B, et al. Study of telescopic gangway motions in time domain during offshore operation[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 230: 108692.
- [34] QIU J C, QIU W H, NIU A Q, et al. Modeling and analysis of offshore gangway under dynamic load[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 77.
- [35] HUANG W, LI B B, CHEN X B, et al. Numerical and experimental studies on dynamic gangway response between monohull flotel and FPSO in non-parallel side-by-side configuration[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149: 341–357.
- [36] 薛忠健. 基于 D-H 法的锻造机器人运动学分析 [J]. *机电工程技术*, 2020, 49(11): 40–42, 128.
- XUE Z J. Kinematic analysis of forging robot based on D-H method[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(11): 40–42, 128 (in Chinese).
- [37] 高跃, 房立金, 姜雪洁, 等. 一种基于 D-H 参数的 7 自由度机械臂机构精度综合方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 137–145.
- GAO Y, FANG L J, JIANG X J, et al. Research on the precision synthesis method of a 7 DOF manipulator based on D-H parameters[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 137–145 (in Chinese).
- [38] 程伟, 屈福康, 肖金. 改进的 D-H 参数下串联机器人建模与运动学分析 [J]. *自动化技术与应用*, 2022, 41(5): 97–99, 124.
- CHENG W, QU F K, XIAO J. Robot modeling and kinematics analysis based on modified D-H parameters[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2022, 41(5): 97–99, 124 (in Chinese).
- [39] 刘畅, 周瑞平, 刘轩. 大型波浪补偿舷梯运动学建模与仿真 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(7): 95–100.
- LIU C, ZHOU R P, LIU X. Modeling and simulation of motion compensated gangway in kinematics[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(7): 95–100 (in Chinese).
- [40] 林泽, 吴正平, 杜佳璐. 海上舷梯末端点位置终端滑模镇定控制 [J]. *大连海事大学学报*, 2023, 49(3): 97–105.
- LIN Z, WU Z P, DU J L. Terminal sliding mode stabilization control of offshore gangway tip position[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2023, 49(3): 97–105 (in Chinese).
- [41] LIANG L H, LE Z W, ZHANG S T, et al. Modeling and controller design of an active motion compensated gangway based on inverse dynamics in joint space[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106864.
- [42] ZHANG Q, WANG X Y, ZHANG Z Z, et al. Wave heave compensation based on an optimized backstepping control method[J]. *China Ocean Engineering*, 2022, 36(6): 959–968.
- [43] SHAO Y L, WU J M. Positive kinematics solution of a six-degree-of- freedom parallel platform based on neural network algorithm[C]//Proceedings of 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering. Xiamen, China: IEEE, 2019: 1387–1390.
- [44] 李光, 肖帆, 杨加超, 等. 基于唯一域方法的机器人逆运动学求解 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 386–394.
- LI G, XIAO F, YANG J C, et al. Solution of inverse kinematics of robots based on unique domain method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 386–394 (in Chinese).

- [45] ZHANG G Y, TAN F, WU Y X. Ship motion attitude prediction based on an adaptive dynamic particle swarm optimization algorithm and bidirectional LSTM neural network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 90087–90098.
- [46] 夏骏达, 郑伟伦, 王子涵, 等. 基于 EMD-LSTM 的船舶运动姿态短期预测 [J]. *计算机与数字工程*, 2022, 50(7): 1434–1438.
- XIA J D, ZHENG W L, WANG Z H, et al. Short-term prediction of ship motion attitude based on EMD-LSTM [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2022, 50(7): 1434–1438 (in Chinese).
- [47] 张新宇, 蔡烽, 王骁, 等. 基于回声状态网络的海浪谱实时预报方法 [J]. *海洋预报*, 2018, 35(5): 34–40.
- ZHANG X Y, CAI F, WANG X, et al. Real-time forecast method of wave spectrum based on echo state network [J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(5): 34–40 (in Chinese).
- [48] 刘祥勇, 徐志强, 谌志新. 波浪被动补偿装置的模型与实验 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(10): 1518–1524.
- LIU X Y, XU Z Q, SHEN Z X. Model and experiments of wave passive compensation device[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(10): 1518–1524 (in Chinese).
- [49] 王海飞, 党罡, 姚树新, 等. 半主动式恒钻压波浪补偿系统的研究 [J]. *西安石油大学学报 (自然科学版)*, 2018, 33(4): 82–87.
- WANG H F, DANG G, YAO S X, et al. Study on active heave compensation system of constant drilling pressure [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2018, 33(4): 82–87 (in Chinese).
- [50] LENG J X, XU C G, LI M, et al. Control strategy for performing predictions for a semi-active compensation system[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109816.
- [51] 宋豫, 胡中望. 船舶起重机半主动升沉补偿控制特性研究 [J]. *液压与气动*, 2018(2): 33–39.
- SONG Y, HU Z W. Semi-active heave compensation control character of ship crane[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(2): 33–39 (in Chinese).
- [52] 安万平, 陈懿. 基于登船栈桥的主动波浪补偿液压控制原理的研究 [J]. *装备制造技术*, 2019(12): 15–18.
- AN W P, CHEN Y. Research of active wave compensation system based on gangway[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2019(12): 15–18 (in Chinese).
- [53] ROY S, KAR I N, LEE J, et al. Adaptive-robust time-delay control for a class of uncertain Euler–Lagrange systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7109–7119.
- [54] TAJDARI F, TAJDARI M, REZAEI A. Discrete time delay feedback control of stewart platform with intelligent optimizer weight tuner[C]//*Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Xi'an, China: IEEE, 2021: 12701–12707.
- [55] YIN R J, XIE W, WEN Y, et al. Robust wave compensation controller design for an active hexapod platform with time-varying input delays[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 274: 114084.
- [56] YIN L, QIAO D S, LI B B, et al. Modeling and controller design of an offshore wind service operation vessel with parallel active motion compensated gangway[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112999.
- [57] CAI Y F, ZHENG S T, LI W T, et al. Sliding-mode control of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation using velocity feedforward[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109477.
- [58] 任祯琴, 李静, 李德光. 广义离散时间系统的 P-D 反馈控制器设计 [J]. *应用科技*, 2021, 48(6): 58–62, 78.
- REN Z Q, LI J, LI D G. The design of P-D feedback controller for descriptor discrete time systems[J]. *Applied Science and Technology*, 2021, 48(6): 58–62, 78 (in Chinese).
- [59] 李铁军, 董跃巍, 杨冬. 协作机器人遥操作运动学映射与导航控制策略研究 [J]. *机械设计与制造*, 2020(3): 258–260, 264.
- LI T J, DONG Y W, YANG D. Kinematic mapping and admittance control of collaborative robot teleoperation [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(3): 258–260, 264 (in Chinese).
- [60] ZHOU M J, WANG Y Q, WU H B. Control design of the wave compensation system based on the genetic PID algorithm[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 2152914.
- [61] 朱传同, 苑得鑫, 李卓军. 基于非线性模糊滑模控制算法的多缸液压设备同步控制研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31(9): 137–143.
- ZHU C T, YUAN D X, LI Z J. Research on synchronous control of multi-cylinder hydraulic equipment based on nonlinear fuzzy synovial control algorithm[J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(9): 137–143.
- [62] 郭焱, 王超, 解文祥. 用于船舶永磁推进电机驱动控制的 MMC 模型预测方法 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(4): 179–189, 198.
- GUO Y, WANG C, XIE W X. MMC model predictive control method applied to ship permanent magnet propulsion motor drive[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(4): 179–189, 198. (in Chinese).
- [63] ZHOU M, WANG Y, WU H, et al. Optimal parametric design of bulkhead vibration control for underwater structure[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019: 1–13.
- [64] HUANG H C, XU S S D, CHEN Y X, et al. Reinforcement fuzzy Q-learning incorporated with genetic kinema-

- tics analysis for self-organizing holonomic motion control of six-link Stewart platforms[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2023, 25(3): 1239–1255.
- [65] 丁志龙, 王鹏, 王永刚, 等. 改进自适应遗传算法优化的船用增压锅炉上锅筒水位滑模控制方法 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(2): 1–6.
- DING Z L, WANG P, WANG Y G, et al. Sliding mode controller with improved AGA for supercharged boiler drum water level control[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(2): 1–6 (in Chinese).
- [66] ABDOLRASOL M G, HUSSAIN S M, USTUN T S, et al. Artificial neural networks based optimization techniques: a review.[J]. *Electronics*, 2021, 10: 2689.
- [67] YIN Z H, QIN R J, LIU Y N. A new solving method based on simulated annealing particle swarm optimization for the forward kinematic problem of the Stewart–Gough platform[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7657.
- [68] BINGUL Z, KARAHAN O. Real-time trajectory tracking control of Stewart platform using fractional order fuzzy PID controller optimized by particle swarm algorithm[J]. *Industrial Robot*, 2022, 49(4): 708–725.
- [69] 党浩明, 周亚丽, 张奇志. 六自由度串联机械臂建模与运动学分析 [J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(10): 9–14, 23.
- DANG H M, ZHOU Y L, ZHANG Q Z. Modeling and kinematic analysis of 6-DOF series manipulator[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(10): 9–14, 23 (in Chinese).
- [70] 向明, 冯浩, 黄雨晨, 等. 转动关节串联机器人运动学参数识别与补偿 [J]. *机械设计与研究*, 2022, 38(5): 1–5, 16.
- XIANG M, FENG H, HUANG Y C, et al. The recognition and compensation for kinematic parameters of serial robots in rotating pair[J]. *Machine Design & Research*, 2022, 38(5): 1–5, 16 (in Chinese).
- [71] NIU A Q, WANG S H, SUN Y Q, et al. Dynamic modeling and analysis of a novel offshore gangway with 3UPU/UP-RRP series-parallel hybrid structure[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113122.
- [72] ONO T, ETO R, YAMAKAWA J, et al. Analysis and control of a Stewart platform as base motion compensators - Part I: kinematics using moving frames[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 107(1): 51–76.
- [73] SONG Y B, TIAN W J, TIAN Y L, et al. Calibration of a Stewart platform by designing a robust joint compensator with artificial neural networks[J]. *Precision Engineering*, 2022, 77: 375–384.
- [74] QIAO D S, ZHI G N, YAN J, et al. Active truncation model test method of deep-water mooring system: a numerical simulation study on time delay compensation of actuator motion[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 111: 102645.
- [75] KORAKAS N. Buckling of trusses with eccentric joints[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2022.
- [76] 王宸, 熊志鑫. 海上登靠舷梯结构强度分析 [J]. *海洋技术学报*, 2021, 40(6): 96–102.
- WANG C, XIONG Z X. Structural strength analysis of offshore across gangways[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2021, 40(6): 96–102 (in Chinese).
- [77] DNV. Classification and construction rules[EB/OL]. (2021-06-18)[2023-07-01]. <https://www.dnv.com/news/rules-for-classification-of-ships-july-2021-edition-203529>.
- [78] ZHAO W W. Calibration of design fatigue factors for offshore structures based on fatigue test database[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 145: 106075.
- [79] YETER B, GARBATOV Y. Structural integrity assessment of fixed support structures for offshore wind turbines: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110271.
- [80] DONG P. A robust structural stress method for fatigue analysis of offshore/marine structures[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005, 127(1): 68–74.
- [81] SEBASTIAN H, EIRIK R, KEN T. Design of an offshore footbridge in fiber reinforced polymer[D]. Norway: University of Agder, 2018.
- [82] 郑传祥, 朱军, 苏小芳, 等. 海工结构复合材料包覆隔离防腐技术研究 [J]. *化工装备技术*, 2020, 41(5): 39–42.
- ZHENG C X, ZHU J, SU X F, et al. Research on the technology of coating, isolation and anticorrosion of marine structure composite materials[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2020, 41(5): 39–42 (in Chinese).