

# 海洋工程典型装备智能化研究进展

阎军<sup>1,2</sup>, 苏琦<sup>1</sup>, 许琦<sup>2</sup>, 杨建业<sup>2</sup>, 陈金龙<sup>2</sup>, 卢海龙<sup>1</sup>, 武文华<sup>1,2\*</sup>

1. 大连理工大学工业装备结构分析优化与CAE软件全国重点实验室, 力学与航空航天学院, 大连 116024

2. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315016

**摘要** 为了推动海洋工程装备智能化发展、加快智慧海洋工程装备建设, 综述了海洋油气资源开发中关键装备的实践创新, 包括海洋柔性立管及脐带缆、海洋浮体结构以及海洋结构监测技术3个研究领域。首先, 通过对现阶段的海洋柔性立管及脐带缆发展现状进行系统阐述, 总结了智能算法在结构分析与设计中的探索尝试; 其次, 介绍了海洋浮体结构的理论模型、数值模拟和模型实验在智能化方向的发展历程, 指出了现阶段分析技术的局限性及未来的重点研究方向; 最后, 梳理了海洋装备结构智能化监测技术的应用研究, 强调了监测技术作为智能感知的重要途径, 在未来的发展中将逐渐标准化与智能化。随着信息技术高速发展, 传统自动化手段难以解决海洋装备运维过程中面临的新挑战。全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测以及协同控制等多种智能化技术综合应用于海洋工程装备, 已经是未来发展的必然趋势。

**关键词** 海洋工程装备; 智慧海洋; 海洋柔性立管; 海洋浮体结构; 海洋结构监测

海洋工程作为海洋资源开发和利用的重要技术领域, 近年来得到了广泛的关注和持续的发展。随着能源需求的增长和技术的进步, 海洋资源的开发和利用成为了全球范围内的热门话题。然而, 海洋环境的特殊性和复杂性给海洋工程的设计、建造和运营带来了极大挑战。为了更好地解决这些问题, 海洋工程典型装备的智能化设计、分析和监测技术成为了海洋工程领域发展的重要驱动力。近

年来, 传感器技术、数据分析和机器学习等智能技术的蓬勃发展, 推动了海洋工程装备的智能化研究和应用, 智能化技术的集成与应用不仅优化了海洋装备的设计分析与运营效率, 还极大地提高了装备的安全性与环境适应性。

本文探讨几类典型海洋装备结构, 包括海洋系泊结构、细长柔性管/缆结构、浮式平台结构的智能化研究的发展、应用和未来趋势。

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1906233, 52201312); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2021RD16); 宁波市科技创新2025重大专项(2022Z061); 辽宁省自然科学基金项目(2023-BSBA-052)

作者简介: 阎军, 教授, 研究方向为智能海洋柔性装备创新设计, 电子信箱: yanjun@dlut.edu.cn; 武文华(通信作者), 教授, 研究方向为海洋工程结构监测, 电子信箱: lxuhua@dlut.edu.cn

引用格式: 阎军, 苏琦, 许琦, 等. 海洋工程典型装备智能化研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 16-26;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01195

## 1 海洋柔性管/缆结构智能化

### 1.1 柔性立管及脐带缆智能化设计

随着海洋能源开发不断走向深海,具有较高柔顺性的立管及脐带缆等结构开始广泛应用。恶劣的深远海环境为柔性管/缆的设计研究带来了新的挑战。一方面,针对不同的服役海域与设计要求,柔性管/缆的水下线型往往会被布置成多种形态,如图1所示,如何进行线型的快速准确设计是一个关键技术问题。另一方面,以脐带缆为代表的多构件柔性复合结构截面布局复杂,其截面设计问题需涉及多学科的优化。

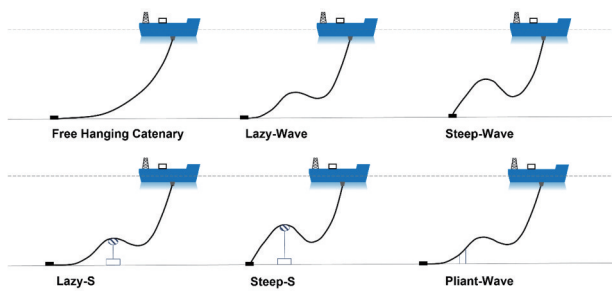


图1 柔性管/缆常用整体线型示意

针对柔性管/缆的线型设计研究,Larsen等<sup>[1]</sup>于1999年首次基于遗传(GA)算法实现了线型优化设计,随后多名研究人员基于遗传算法开展了多项相关工作<sup>[2-6]</sup>。同时,多种其他零阶优化算法也用于进行脐带缆的线型优化,如人工免疫系统优化(IA)算法,粒子群优化(PSO)算法,模拟退火(SA)算法等。Yang等<sup>[7]</sup>基于Kriging代理模型代替了脐带缆的非线性时域分析过程,并将其应用于脐带缆可靠性优化设计,为解决脐带缆线型分析代价高昂的问题提供了新的解决思路。随着计算机技术的不断革新,出现了各种高效的人工智能模型。人工神经网络<sup>[8]</sup>(ANN)、贝叶斯神经网络<sup>[9]</sup>(BNN)、残差神经网络<sup>[10]</sup>(ResNet)等模型被应用在了柔性立管、脐带缆等柔性结构的整体线型智能化快速设计研究中。若在柔性管/缆线型设计中进一步考虑长期服役带来的疲劳损伤,则将变为多目标优化设计问题。基于此,Yan等<sup>[11]</sup>针对缓波型脐带缆的整体线型设计,提出了一种基于代表性

疲劳工况的多目标优化设计框架,并利用代理模型技术处理线型设计变量与疲劳应力响应间的映射关系。Bhowmik等<sup>[12]</sup>基于随机森林-元模型耦合进化(RF-EA)算法开展了最小化材料成本与最小化疲劳损伤的立管线型多目标优化设计研究,上述研究均给出了兼具抗疲劳性能与经济成本的柔性管/缆线型设计方案。

针对柔性管/缆的截面设计研究(图2),目前针对脐带缆的截面设计研究较少,现有的脐带缆设计规范<sup>[13]</sup>中要求脐带缆截面构件排布应尽可能遵循紧凑与对称的原则,但是并没有给出可量化的指标和操作方法,缺乏实际的指导意义。基于上述问题,Yang等<sup>[14]</sup>考虑了脐带缆截面紧凑性、对称性、平衡性和热分布的特性,给出了其数学优化框架,并采用粒子群优化算法进行截面的多学科布局优化设计。Yin等<sup>[15]</sup>提出了一种基于遗传算法与广义乘子法结合的GA-GLM优化算法求解脐带缆截面的布局优化问题,具有较好的精度与效率。Wang等<sup>[16]</sup>提出了一种新型的高效金字塔尺度聚合-U-Net卷积神经网络(EPSA-U-Net),实现了对脐带缆截面布局的实时准确预测,与传统CNN相比,准确率高达93.28%(图3)。Yan等<sup>[17]</sup>则考虑了脐带缆的强度可靠性指标,以关键构件的尺寸作为设计变量,开展了脐带缆截面的可靠度优化设计,并采用了PSO算法进行求解,优化结果显示可靠度较初始设计提高了67.43%,该工作为脐带缆截面的高可靠性设计提供了思路。

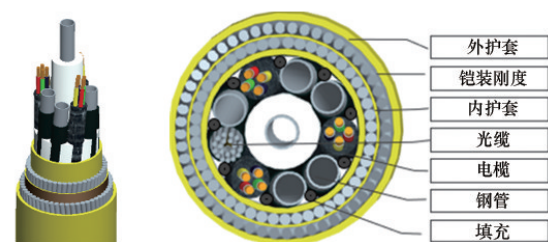


图2 脐带缆截面示意



图3 基于EPSA-U-Net的脐带缆截面布局结果

## 1.2 柔性立管及脐带缆智能快速化分析

海洋柔性管/缆结构具有多材料、多构件、螺旋缠绕等特点,在服役期间往往受到随机海洋环境、浮体运动及自身质量的组合载荷作用,同时构件之间又存在接触、摩擦、大位移、大变形等多重非线性因素,对这类结构动态响应的高效准确计算成为待解决的难点之一。传统动态响应求解思路是考虑环境和浮体运动等荷载的作用,基于有限元方法进行时域模拟往往需要大量的时间和计算成本,这样的效率已经难以满足当前研究领域对响应计算时效的需求。随着人工神经网络(ANN)等具有代表性的人工智能模型应用越来越广泛,这类模型具有非线性拟合能力强、响应快速的特点,其可行性也被越来越多的研究证实,近年来逐渐有研究人员开始将其引入海洋柔性管/缆响应预测研究<sup>[18-21]</sup>。

Guarize 等<sup>[22]</sup>使用了一种有效的混合人工神经网络-有限元方法(ANN-FEM),将当前和过去的系统激励作为输入,映射后续的系统响应,替代了有限元的模拟过程。de Pina 等<sup>[23]</sup>针对系泊缆与立管的快速分析与设计问题,将 ANN 与具有外源输入的非线性自回归(NARX)模型相结合,以历史浮体运动位移序列与顶部张力序列作为输入进行模型训练,并对系泊缆与立管顶部张力进行预测。后续作者又进一步提出了一种基于小波网络的新方法,将前馈神经网络与小波变换相结合,依旧使用顶部张力序列和浮体运动序列的历史数据作为输入,其预测结果与有限元结果精度相近,同时计算时间显著减少<sup>[24]</sup>。Yang 等<sup>[25]</sup>提出了一种基于储备池计算(RC)方法的机器学习模型来预测系泊缆的张力,利用张力的低频和波频部分,结合主要的浮体运动,训练 RC 模型,最后通过叠加这 2 个张力分量获得系泊缆的有效张力预测数据。上述工作均围绕系泊张力序列预测问题展开,从单一序列输入的预测逐步向多维输入拓展。随着问题维度与复杂性的增加,浅层的神经网络模型逐渐无法满足分析需求,卷积神经网络模型及其各种变体被主要应用于该领域。da Silva 等<sup>[26]</sup>提出了一种用于预测海洋管缆结构响应的 LengthNet 深度学习模型,可实现管缆顶部至触地段区域内的响应预测。与传统

的 NodeNet 相比,其模型性能有所提高,对于沿空间分布下的时间序列数据预测具有较强的适用性。Yan 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于长短期记忆(LSTM)神经网络预测脐带缆顶部张力响应时间序列的有效方法,并与自回归积分移动平均(ARIMA)模型进行分析与比较,验证了 LSTM 神经网络模型的效率和准确性。Xie 等<sup>[28]</sup>采用门控循环单元(GRU)网络进行系泊缆张力预测,该模型能够利用船舶运动的 6 自由度响应或波浪分量( $H_s$ 、 $T_p$ 、 $\theta$ )准确地预测系泊缆张力(图 4)。Ma 等<sup>[29]</sup>采用了结合注意力机制的 LSTM 模型(LSTM-AM)对水下软钢臂系泊系统的动态张力进行预测。将 FPSO 的 6 自由度运动及其一阶和二阶中心矩作为输入数据序列,预测系泊张力。结果表明在相同条件下,LSTM-AM 模型比 LSTM 具有更高的预测精度。除了响应序列预测外,不少研究人员将人工智能技术应用于损伤诊断。Rezaniaiee 等<sup>[30]</sup>基于 RBF 模型提出了一套适用于复杂力学行为下的系泊缆损伤诊断方法。将缆绳多个等距节点的挠度和角度作为输入,从而实现损伤位置的定位及损伤类型的划分。并通过仿真和实验对其诊断精度进行了验证,证明了其方法的可行性。

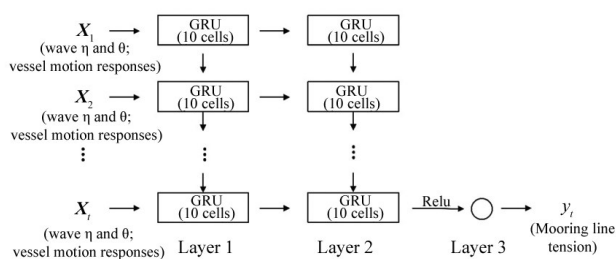


图4 用于系泊缆张力预测的GRU模型架构

## 2 海上装备浮体式结构的智能化

针对海上油气开发,其浮体结构可分为如下的类别:浮式生产储运装置(floating production storage and offloading, FPSO)、半潜式钻井平台(semi-submersible drilling platform, SEMI)、张力腿平台(tension leg platform, TLP)和单立柱平台 Spar。而在中国乃至世界范围, FPSO 和半潜式平台已经成为海洋油气开发的主力装备。针对海上风资源开

发,目前深远海多采用漂浮式风机平台作为风机的支撑,其设计经验,大多借鉴了油气行业的长期实践与经验积累。根据静水稳性获取原理的不同,浮式风机大致可分为驳船式、半潜式、单立柱式、张力腿式。海洋浮体智能化是通过海洋浮体进行后期改造,将人工智能算法模块有机地嵌入到现有海洋浮体结构中,从而提升其识别、推理、判断、决策、控制和环境适应的能力的技术。海洋装备浮体结构包括典型的海洋石油平台、液化天然气运输船、深远海网箱装置、港内船舶、浮式防波堤、超大型浮体结构物和浮式风机平台等(图5)。

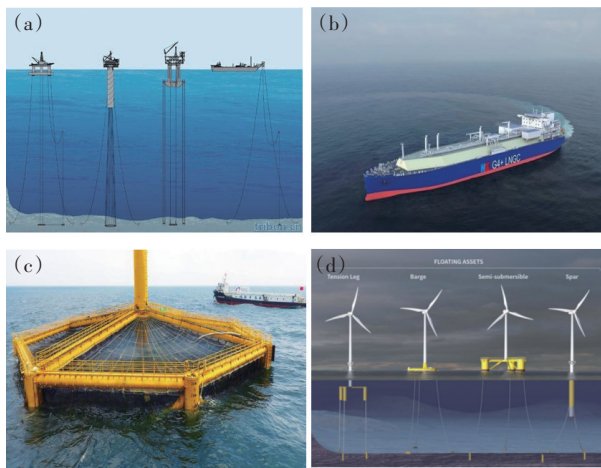


图5 海洋浮体结构物

这些装备是开发和利用海洋资源的重要基础,其发展随着人工智能技术的迅猛发展而在智能化方面取得巨大进步。研究人员为装备浮体结构的智能化设计和发展提出了建设性的研究思路和路线,为助力海洋装备浮体结构的智能化研究提供基础。

### 2.1 海上浮式结构智能化监测/预测

随着人工智能算法的发展,其在图像处理、特征提取、时间序列预测等领域展现了强大的处理能力。对于在海洋环境中长时运行的浮式结构,智能化的监测/预测研究成为了海上浮式结构研究中的热点。

Sacie 等<sup>[31]</sup>采用不同的机器语言学习技术对海洋气象变量进行预测,以获取海上风力涡轮机的最佳部署位置。同时,对浮式风力涡轮机发电效率有显著影响的3个变量:风速、波浪和风浪向偏差进

行了分析。结果表明非线性回归的外源输入神经网络模型在风速和风浪向偏差预测方面效果最优;而高斯过程回归(GPR)模型对于在频域内有效波高的预测更为精准。这些模型对于海上浮式风机部署和安装及盈利具有重要作用。Tay<sup>[32]</sup>提出了一种神经网络训练的代理模型,缩短了预测超大型浮体(VLFS)水弹性响应的计算时长。将不同波长、结构刚度和波向下的水弹性响应分为3组,用于训练、验证和测试。针对不同的训练数据集、神经元和隐藏层的数量以及优化技术,比较了相关系数方面的预测准确性。Saghi 等<sup>[33]</sup>基于Cuckoo搜索-最小二乘支持向量机模型(CS-LSSVM)的机器学习方法对理想化系泊矩形和梯形浮式防波堤(FB)水动力性能进行评价,结果表明浮式防波堤的长宽比和它的侧壁系泊角的适当组合,可以帮助衰减传入波到最小的高度。系泊梯形浮式防波堤比传统的矩形设计更有效,并进一步验证CS-LSSVM模型在优化预测波浪透射系数方面具有显著效果。王程等<sup>[34]</sup>基于高通量卫星通信链路,融合先进的声光水下传感器、人工智能等信息技术,提出了深远海网箱智能化养殖监测系统,以应对存在的监管困难、水下信息获取过程烦琐、离岸信息传输复杂等挑战,从而将养殖技术、装备技术和信息技术有机组合,以及海产养殖生产自动化、管理信息化、决策智能化,以及传统渔业与智能科技深度融合。王奕<sup>[35]</sup>基于深度学习算法开展了海洋渔业数据特征提取、复杂海洋环境下的目标检测与定位、面向海洋渔业的异常检测等研究。通过深度卷积神经网络学习海洋渔业数据特征,利用DenseNet的设计结构提高特征表示性能,将海洋渔业目标类别信息回传到深度卷积神经网络的每一层,提高网络对雷达图像中关键判别信息的抓取能力。

### 2.2 海上浮式结构智能化控制

海上浮式结构大多是集生产和生活为一体的系统,自动化的控制系统是保障安全和正常运行的基础。控制系统是基于计算机技术、通信技术及人员实时监测、预警和管理,同时综合多维信息向控制人员提供辅助决策支持,有效保证浮式结构的安全性。

邓燕等<sup>[36]</sup>提出了海洋石油平台智能化系统框架,以建立大数据系统为基础、开发以专家系统为核心的发展工艺流程管理系统、设备信息管理系统和设备故障诊断系统,从而实现海洋石油平台从自动化、数字化过渡转型发展为信息化、智能化。刘红霞<sup>[37]</sup>研究了深海作业的FPSO智能化控制系统,基于计算机技术、通信技术、物联网技术对海洋平台船体结构、设备及人员实时监测、预警和管理,同时综合船岸等多维信息向操作者提供辅助决策支持,有效保证海洋平台的正常运行,保障平台、设备和运维工作人员的安全,控制系统智能化设计流程如图6所示。Zhang等<sup>[38]</sup>开创性地将基于强化学习的控制方法应用于主动调制质量阻尼器的浮式风力发电机结构控制问题中,利用自适应动态规划算法推导基于非线性结构动力学的最优控制律,并通过大规模机器学习平台Tensorflow的神经网络结构进行设计和实现。根据浮式风机结构控制的仿真结果可知,自适应动态规划(ADP)控制器在正常和极端条件下具有良好的表现,浮式平台基础的纵摇标准差减少了约40%。楼丹平等<sup>[39]</sup>详细介绍了液化天然气(LNG)船的智能化发展趋势集中于提高营运安全、能效管理和智能辅助决策方面,包括智能航行、智能能效管理、智能货物管理和智能机舱4个方向。智能航行主要是通过应用感知技术,包括雷达、视觉传感等,融合数据分析、控制算法与岸基支持等智能化技术来实现航线的优化以及自动避碰和自主航行。

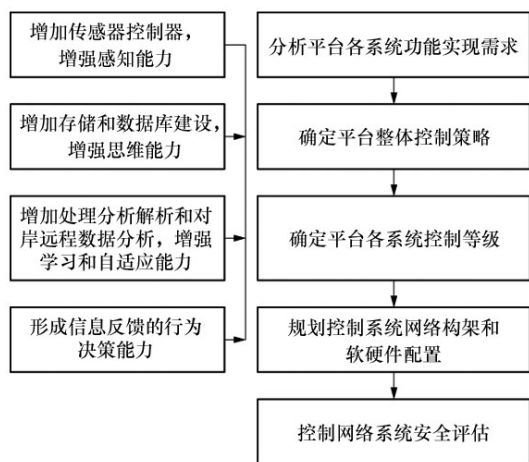


图6 控制系统智能化设计流程

### 3 海洋装备结构智能化监测技术

智能化是海上能源开发技术发展的新阶段,也是海洋工程领域技术革命和升级发展的必然要求。《中国制造2025—能源装备实施方案》中,将推进深水油气装备智能制造列为能源装备发展任务之一<sup>[40]</sup>。智能感知作为海洋工程装备智能化的先决条件,基于多源传感器融合进行服役状态监测和系统参数在线监测,实现海洋装备的全面感知。由此可见,监测技术是海洋结构安全保障和设计验证的重要手段,同时弥补了模型实验与水动力学仿真中对环境载荷和结构模型简化研究的不足。

海洋工程领域的监测技术研究始于20世纪80年代后期,首个海洋平台监测项目在CONOCO Joliet张力腿平台开展<sup>[41]</sup>。经过30多年的技术发展,现场监测技术逐渐被海洋工程领域所认可,并在各类海洋平台中得到了更广泛的应用。在初期,英国Saab、BMT,美国Dunegan、Bentley,挪威CorrOcean等公司针对各式海洋装备开发了综合的监测系统,并在海洋平台监测和运维领域率先开展了应用研究。近年来,国内的企业与高校对于海洋装备的监测、智能运维和数字孪生逐渐重视,中国海洋石油总公司<sup>[42]</sup>、大连理工大学<sup>[43]</sup>、上海交通大学<sup>[44]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[45]</sup>、中国海洋大学<sup>[46]</sup>等单位在海洋平台的监测软硬件开发、完整性管理与运维等方面取得了长足的技术积累和进步。尤其是在冰区导管架平台监测、FPSO及其系泊系统监测和深水半潜式平台监测等领域达到了较为领先的技术水平。

#### 3.1 海洋环境监测

1) 风荷载是海洋结构在服役过程中受到的主要荷载形式之一<sup>[47]</sup>。在役海洋平台现场风速风向监测是油气开发的重要环境条件保障。海洋风环境监测信息主要为风速和风向2个物理量。

2) 波浪荷载是系泊系统设计考虑的重要环境荷载之一<sup>[48]</sup>。现有波浪测量方法根据仪器布置位置可分为水下测量、水面测量及水上测量3种方法。

3) 海流荷载是水下生产系统和系泊系统强度失效与流致振动疲劳失效的主要荷载形式。海流监测方式分为测量单一测点海流计和测量海流剖

面的剖面仪<sup>[49]</sup>。海洋平台海流信息监测现阶段多利用声学多普勒流速流向剖面仪(ADCP)对分层海流流速及流向进行测量<sup>[50]</sup>(图7)。

### 3.2 浮体及上部结构监测

海洋平台浮体和上部结构姿态监测通常将浮体和上部结构运动模型化为刚体运动,测量在役结构3个方向的平动和转动自由度。采用的传感器主要有GPS、INS、倾角传感器及低频加速度传感器<sup>[51]</sup>。传感器安装位置一般位于平台轴线方向,以减少平台运动加速度对监测数据的影响(表1)。

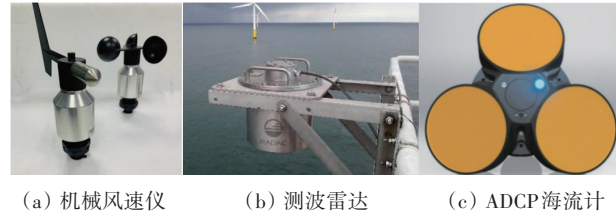


图7 海洋环境监测传感器

表1 平台运动测量原理和适用性

类型	测量原理	现场监测适用性
DGPS	伪距差分原理、载波相位差原理	位置信息测量,全天候,全覆盖,适用性广
INS	机械陀螺仪	角速度测量,精度高,长期测量存在漂移
DGPS/INS	动态校准	抗干扰、动态精度高,厘米级精度
低频加速度	牛顿第二定律、电磁感应原理	安装简单,适合海洋结构运动频率区间
倾角传感器	固体摆、液体摆、气体摆	安装简单,适用范围广

### 3.3 系泊结构及管缆结构监测

1) 系泊力和系泊链的动、静态特征(静态倾角和动态加速度)是系泊系统监测的主要内容。国际上常采用顶端张力测量、水中传感器测量和机器人辅助测量等手段。其中自容式传感器和水声传输等(图8(a))监测方式在中国南海“挑战号”浮式生产系统(FPS)平台监测已完成了较长周期的应用<sup>[52]</sup>。

2) 张力腿和顶部张紧式立管(TTR)可采用较为相似的监测方法,主要测量内容为顶部张力、水下运动姿态以及底部在位情况。TTR立管和张力腿顶部张力监测主要利用顶张力传感器和光纤光栅传感器<sup>[53]</sup>(图8(b)(c))。近年来,水下结构监测网络成为了水下结构监测的热点。水下管缆也可

以通过预置式测量方案,将光纤光栅传感器在管缆制造时预置入结构内部,从而达到完整长度应变、温度等信息测量的目的。

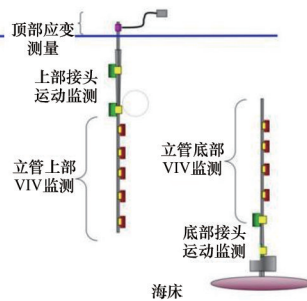
### 3.4 热点应力和局部损伤监测

1) 浮体结构热点应力监测是评价浮体结构易损性能的主要手段。考虑到温度对材料应变的影响,在测量热点应变时需要与温度数据同时测量,或利用温度补偿减小温度变化对应变测量的干扰。应变监测传感器包括应变片、光纤传感器,压电材料传感器等<sup>[54-55]</sup>。

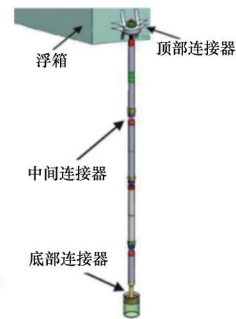
2) 海洋平台和系泊结构的局部损伤评估采用无损检测的手段。现阶段无损检测主要有应变监测、超声波检测、射线检测和磁力探伤检测几种。超声检测主要有穿透探伤法和反射探伤法。目前



(a) 水下自容式传感器



(b) TTR立管监测



(c) 张力腿监测

图8 系泊系统及管缆监测传感器

无损检测已经在系泊锚链、平台焊接结构领域有了较多的应用与研究<sup>[56-59]</sup>。

### 3.5 监测数据集成与监测信息分析评价技术

考虑传输数据的采样频率和采集类型多样性,海洋平台监测系统一般设置传输集成工作站对采集数据进行下位存储和整理。在中控室设置监测上位机,集成储存标准化监测数据。目前,随着信号传输技术的发展,监测系统可利用的传输方式逐渐增多,常见的有北斗卫星传输、微波传输和散射传输几种<sup>[60]</sup>。中海油信息科技在海洋平台数据多网融合通信研究和工程实践中进行了大量的探索与创新,形成了较为完备的海洋平台信息传输网络<sup>[61]</sup>。

在役海洋平台安全评估、预测、预警以及未来海洋结构设计优化是监测项目应用的核心问题。近年来,随着人工智能的快速发展,基于深度学习方法的海洋结构监测信息分析和评价技术得到了广泛关注<sup>[62-63]</sup>。基于监测大数据发展的智能化分析方法也在海洋工程领域发挥了巨大作用,研究人员利用经验模型<sup>[64-65]</sup>、参数法<sup>[66-67]</sup>及非参数法,乃至数据驱动的机器学习方法<sup>[68]</sup>对风浪流进行了系统的研究,并实现了高精度的数值预测。基于海洋平台运动响应及水下系泊系统姿态的实时监测数据,人们也利用数据驱动进行了极值预测<sup>[69]</sup>和损伤识别分析<sup>[70]</sup>。同时,智能化分析评价技术结合监测大数据,也加速了海洋工程装备智能化的更新升级。Li等<sup>[71]</sup>利用南海半潜平台长期原型监测数据开展了船体与系泊结构参数修正的研究工作。Lyu等<sup>[72-73]</sup>基于中国“渤海友谊号”FPSO实测数据对软刚臂定位系统的动力学行为和铰节点疲劳损伤问题开展分析,为平台设计与升级改造提供参考。未来海洋平台现场监测数据分析将逐渐降低对陆地端科研人员的依赖,通过新理论和新算法的大量应用,在现场对监测数据直接进行实时评估,保障在役结构安全,指导海上资源开发作业。

## 4 结论

探讨了海洋工程中智能化关键技术对海洋立

管及脐带缆、浮体结构与共性监测技术的重要性。通过对上述装备设计和共性监测技术的分析,以及其在海洋工程中的应用实例,得出以下结论。

首先,海洋立管及脐带缆作为海洋资源开发的关键组成部分,在深海环境中承担着重要任务。其稳定性、安全性直接影响到整个海洋工程的可靠性和长期运营效率。因此,对其设计、分析技术智能化优化和创新至关重要。

其次,海洋浮体结构在海洋油气开采和风能开发中发挥着关键作用。讨论了海上油气开发平台类型,包括FPSO、半潜式钻井平台、张力腿平台和单立柱平台,以及海上风资源开发中的漂浮式平台类型。每种平台类型都针对于结构、稳定性原理、特点和典型应用进行了描述,涵盖了国内外的案例和研究成果。

最后,智能化监测技术作为海洋工程装备智能化的重要手段,通过多源传感器融合进行系统参数在线监测,实现了海洋装备的全面感知。这种技术对海洋结构安全保障和设计验证起着至关重要的作用。随着人工智能等技术的不断发展,基于深度学习方法的海洋结构监测信息分析和评价技术也逐渐受到广泛关注。

未来,通过新理论和新算法的大量应用,海洋装备的智能化设计、分析和实时评估在提高设计效率、保障在役结构安全,指导海上资源开发作业方面将起到越来越重要的作用。

## 参考文献(References)

- [1] Larsen C M, Hanson T. Optimization of catenary risers[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1999, 121(2): 90-94.
- [2] Vieira L T, de S L P de Lima B, Evsukoff A G, et al. Application of genetic algorithms to the synthesis of riser configurations[C]//Proceedings of ASME 2003 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Cancun: ASME, 2009: 391-396.
- [3] Yang H Z, Jiang R H, Li H J. Optimization design of deepwater steel catenary risers using genetic algorithm [M]//Computational Structural Engineering. Dordrecht:

- Springer Netherlands, 2009: 901–908.
- [4] de Souza Leite Pires de Lima B, Pinheiro J B, Francisco F E N. A hybrid fuzzy/genetic algorithm for the design of offshore oil production risers[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, 64(11): 1459–1482.
- [5] Tanaka R L, De A M C. A genetic algorithm approach to steel riser optimization[C]. *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany: 2006.
- [6] Rentschler M U T, Adam F, Chainho P. Design optimization of dynamic inter-array cable systems for floating offshore wind turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 622–635.
- [7] Yang H Z, Zheng W Q. Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 16(2): 202–213.
- [8] Lal M, Sebastian A, Rana Y. Steel lazy wave riser optimization using artificial neural networks and genetic algorithm[C]//*Proceedings of ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Online: ASME 2021.
- [9] Elsas J H, Casaprima N A G, Cardoso P H S, et al. Bayesian optimization of riser configurations[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109402.
- [10] 张起. 深度学习驱动的脐带缆线型优化设计方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [11] Yan J, Su Q, Li R D, et al. Optimization design method of the umbilical cable global configuration based on representative fatigue conditions[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2023, 48(1): 188–198.
- [12] Bhowmik S, Noiray G, Naik H. Riser design automation with machine learning[C]//*Proceedings of Day 4 Thu, November 14, 2019. Abu Dhabi: SPE*, 2019: SPE-M7219-MS.
- [13] *Petroleum and natural gas industries: Design and operation of subsea production systems—Part 5: Subsea umbilicals: NF M87–208–5–2013. ISO 13628–5[S]*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.
- [14] Yang Z X, Yin X, Yan J, et al. Study on the optimization algorithm of the cross-sectional layout of an umbilical based on the layering strategy[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109120.
- [15] Yin X, Yang Z X, Yan J, et al. Study on the automatic optimization design of the cross-sectional layout of an umbilical with layers based on the GA-GLM[J]. *Marine Structures*, 2023, 88: 103363.
- [16] Wang L F, Shi D Y, Zhang B Y, et al. Accurate and real-time prediction of umbilical component layout optimization based on convolutional neural network[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 282: 115034.
- [17] Yan J, Yang Z X, Zhao P P, et al. Reliability optimization design of the steel tube umbilical cross section based on particle swarm algorithm[C]//*Proceedings of ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Trondheim: ASME, 2017.
- [18] Monsalve-Giraldo J S, Cortina J P R, de Sousa F J M, et al. Hybrid Parabolic Interpolation-Artificial Neural Network Method (HPI-ANNM) for long-term extreme response estimation of steel risers[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 76: 221–234.
- [19] Zhao Y L, Dong S, Jiang F Y. Reliability analysis of mooring lines for floating structures using ANN-BN inference[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2021, 235(1): 236–254.
- [20] Mao Y X, Wang T Q, Duan M L. A DNN-based approach to predict dynamic mooring tensions for semi-submersible platform under a mooring line failure condition[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112767.
- [21] Sivaprasad H, Lekkala M R, Latheef M, et al. Fatigue damage prediction of top tensioned riser subjected to vortex-induced vibrations using artificial neural networks [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113393.
- [22] Guarize R, Matos N A F, Sagrilo L V S, et al. Neural networks in the dynamic response analysis of slender marine structures[J]. *Applied Ocean Research*, 2007, 29(4): 191–198.
- [23] de Pina A C, de Pina A A, Albrecht C H, et al. ANN-based surrogate models for the analysis of mooring lines and risers[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 41: 76–86.
- [24] de Pina A C, Albrecht C H, de Lima B S L P, et al.

- Wavelet network meta-models for the analysis of slender offshore structures[J]. *Engineering Structures*, 2014, 68: 71-84.
- [25] Yang Y, Peng T, Liao S J. Predicting future mooring line tension of floating structure by machine learning[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269: 113470.
- [26] da Silva V R M, Sagrilo L V S, de Araujo B S. Applied deep learning for slender marine structure dynamic analysis[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2022, 144(2): 021701.
- [27] Yan J, Zhang Y Y, Su Q, et al. Time series prediction based on LSTM neural network for top tension response of umbilical cables[J]. *Marine Structures*, 2023, 91: 103448.
- [28] Xie Y J, Tang H S, Low Y M. Deep gated recurrent unit networks for time-domain long-term fatigue analysis of mooring lines considering wave directionality[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 284: 115244.
- [29] Ma G, Jin C L, Wang H W, et al. Study on dynamic tension estimation for the underwater soft yoke mooring system with LSTM-AM neural network[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267: 113287.
- [30] Rezaiaiee Aqdam H, Etefagh M M, Hassannejad R. Health monitoring of mooring lines in floating structures using artificial neural networks[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 164: 284-297.
- [31] Sacie M, Santos M, López R, et al. Use of state-of-art machine learning technologies for forecasting offshore wind speed, wave and misalignment to improve wind turbine performance[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 938.
- [32] Tay Z Y. Artificial neural network framework for prediction of hydroelastic response of very large floating structure[J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 139: 103701.
- [33] Saghi H, Mikkola T, Hirdaris S. A machine learning method for the evaluation of hydrodynamic performance of floating breakwaters in waves[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2022, 17(7): 1447-1461.
- [34] 王程, 张露, 金东东, 等. 基于高通量卫星的深远海网箱智能化养殖监测系统[J]. *卫星应用*, 2022(6): 61-66.
- [35] 王奕. 基于雷达通信和AIS的海洋渔业智能化监管策略研究[J]. *中国新通信*, 2023, 25(13): 12-14.
- [36] 邓燕, 刘志芳, 宫俭纯, 等. 海洋石油平台智能化转型升级关键技术分析[J]. *化工自动化及仪表*, 2020, 47(4): 338-340, 348.
- [37] 刘红霞. 深海海洋平台控制系统智能化研究[J]. *海洋工程装备与技术*, 2019, 6(增刊1): 404-408.
- [38] Zhang J C, Zhao X W, Wei X. Reinforcement learning-based structural control of floating wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(3): 1603-1613.
- [39] 楼丹平, 杨春华. LNG船技术发展趋势[J]. *船舶*, 2023, 34(4): 19-27.
- [40] 中国制造2025—能源装备实施方案[J]. *中国产经*, 2016(6): 66-93.
- [41] Peters D J H, Zimmer R A, Hein N W Jr, et al. Weight control, performance monitoring, and In-situ inspection of the TLWP[C]//*Proceedings of All Days*. Houston: OTC, 1990: OTC-6363-MS.
- [42] 冯加果, 谢彬, 谢文会, 等. 深水浮式平台监测系统研制及应用[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(5): 118-121.
- [43] 武文华, 唐达, 岳前进, 等. 海洋平台结构原型监测及其现场应用[C]//*中国海洋工程学会第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册)*. 南京: 中国海洋学会海洋工程分会, 2013: 8.
- [44] Hu Z, Li X, Li J, et al. Comparative study on a jacket launching operation in South China Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 335-347.
- [45] 何林, 欧进萍. 海洋平台结构损伤监测的传感器总线系统设计[J]. *计算机应用研究*, 2006, 23(9): 136-138, 159.
- [46] 聂杰文. 基于EMD-HHT的海洋平台结构损伤检测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [47] 杨华庭. 近十年来的海洋灾害与减灾[J]. *海洋预报*, 2002, 19(1): 2-8.
- [48] 秦洪德. 船舶运动与波浪载荷计算的非线性方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [49] 单忠伟. 海流测量技术综述[J]. *声学及电子工程*, 2011(1): 1-5.
- [50] Cook H H, Dopjera D E, Thethi R, et al. Riser integrity management for deepwater developments[C]//*Proceedings of Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2006: OTC-17891-MS.
- [51] Chen W, Xiong C B, Yu L N, et al. Dynamic monitoring of an offshore jacket platform based on RTK-GNSS mea-

- surement by CF-CEEMDAN method[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 115: 102844.
- [52] 杜宇, 武文华, 王延林, 等. 基于自容式技术的系泊缆水下监测方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(8): 1003-1008, 1014.
- [53] 韩旭亮, 王世圣, 谢文会, 等. 基于光纤传感技术的结构应力监测试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2021, 50(5): 26-31.
- [54] Ren L, Li H N, Zhou J, et al. Development of health monitoring system for ocean offshore platform with fiber bragg grating sensors[J]. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, 2005: 424-428.
- [55] Duan Z D, Ou J P, Zhou Z, et al. Smart sensors and integrated shm system for offshore structures[M]//*Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 269-278.
- [56] Achenbach J D. Quantitative nondestructive evaluation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(1/2): 13-27.
- [57] Aindow A M, Dewhurst R J, Palmer S B, et al. Laser-based non-destructive testing techniques for the ultrasonic characterization of subsurface flaws[J]. *NDT International*, 1984, 17(6): 329-335.
- [58] Alers G A, Burns L R. EMAT designs for special applications[J]. *Materials Evaluation*, 1987, 45(10): 1184-1189.
- [59] Grandia W A, Fortunko C M. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers[C]//*Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*. NJ: IEEE, 1995, 1: 697-709.
- [60] 崔继鹏, 陈启卫, 张允宁. 海洋石油平台多种通信方式的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(4): 135-137, 140.
- [61] 向景. 海上平台通信系统中多网融合的实践[J]. *中国新技术新产品*, 2019(24): 27-28.
- [62] 姚骥, 武文华, 徐海博, 等. 基于图像化卷积的半潜式平台响应预测[J]. *船舶力学*, 2023, 27(5): 617-626.
- [63] 姚骥, 武文华, 于思源. 基于卷积网络的浮式平台人员舒适度评价[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(1): 82-88.
- [64] Yu S Y, Wu W H, Xie B, et al. Extreme value prediction of current profiles in the South China Sea based on EOFs and the ACER method[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 105: 102408.
- [65] Yu S Y, Wu W H, Naess A. Current profile extreme prediction in the South China Sea based on the EOF-ACER method, by considering current directions[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2021, 31(3): 275-282.
- [66] Yu S Y, Wu W H, Naess A. Extreme value prediction with modified Enhanced Monte Carlo method based on tail index correction[J]. *Journal of Sea Research*, 2023, 192: 102354.
- [67] 张延涛, 吕柏呈, 武文华, 等. 基于现场实测的渤海风速特性研究[J]. *海洋工程*, 2020, 38(1): 147-153.
- [68] Yao J, Wu W H. Wave height forecast method with multi-step training set extension LSTM neural network [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 112432.
- [69] Yao J, Wu W H. Extreme motion prediction and early-warning assessment of semisubmersible platform based on deep learning method[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2021, 31(3): 293-301.
- [70] Yao J, Wu W H, Li S. Anomaly detection model of mooring system based on LSTM PCA method[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 254: 111350.
- [71] Li S, Wu W H, Yao W A. Bayesian based updating of hull and mooring structure parameters of semi-submersible platforms using monitoring data[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 272: 113865.
- [72] Lyu B C, Guo C C, Wu W H, et al. Hinge joint damage identification method of soft yoke mooring system based on multibody dynamic modeling and structural monitoring data[J]. *Marine Structures*, 2020, 74: 102808.
- [73] Lyu B C, Wu W H. Dynamic characteristics analysis of an in-service SYMS based on long-term field monitoring [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265: 112648.

## Overview on research progress of typical intelligent equipment in marine engineering

YAN Jun<sup>1,2</sup>, SU Qi<sup>1</sup>, XU Qi<sup>2</sup>, YANG Jianye<sup>2</sup>, CHEN Jinlong<sup>2</sup>, LU Hailong<sup>1</sup>, WU Wenhua<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, School of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China

**Abstract** In the context of promoting green and low-carbon energy development and structural transformation, traditional energy technology urgently requires innovation and enhanced capabilities. Therefore, intelligent technology for marine engineering equipment is rapidly advancing but faces challenges such as weak independent innovation capabilities, lacking some critical core technologies, and insufficient supporting capacities for key components. To drive the intelligent development of marine engineering equipment and accelerate the construction of intelligent marine engineering equipment, this paper reviews the practical innovations of key equipment in the development of marine oil and gas resources. This includes three research areas: Marine flexible risers and umbilical, marine floating structures, and monitoring technology for marine structures. Firstly, by systematically expounding the current development status of marine flexible riser and umbilical, intelligent algorithms in structural analysis and design are summarized. Secondly, the development progress of intelligent marine floating structures is introduced and the limitations of current analysis technology and future research directions are highlighted. Lastly, the application research of intelligent monitoring technology for marine equipment structures is reviewed and monitoring technology as a crucial pathway for intelligent perception is emphasized. With the rapid advancement of information technology, traditional automation methods are inadequate to address new challenges in the marine equipment maintenance process. The article suggests that comprehensive application of various intelligent technologies such as full perception, real-time interconnection, analysis-based decision-making, autonomous learning, dynamic prediction, and collaborative control in marine engineering equipment should be an inevitable trend for future development.

**Keywords** marine engineering equipment; intelligent marine; marine flexible riser; marine floating structure; marine structure monitoring ●



(责任编辑 王微)