

圆筒型 FPSO 张紧式系泊系统优化设计

陈兴上¹, 连子祥², 储 备³, 张幸鹏¹, 张雅立¹, 马永奇^{1*}

(1. 海南大学 海洋技术与装备学院, 海口 570228; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 南京 210024)

摘 要: [目的]为应对风浪流联合作用下, 深水圆筒型浮式生产储卸油装置(FPSO)系泊系统面临的安全性及经济性双重挑战, 旨在通过系统性分析与优化方法, 为该装置系泊系统的设计与性能保障提供技术支撑。[方法]采用 AQWA 与 OrcaFlex 联合仿真技术, 开展 FPSO 系泊系统动态响应仿真分析。基于 ANSYS Workbench 与 AQWA 平台构建圆筒型 FPSO 湿表面精细化数值模型, 完成频域水动力特性分析, 获取平台水动力参数; 利用 OrcaFlex 软件建立平台-系泊系统多体耦合动力学模型, 通过时域动态分析, 系统探究系泊缆长度、系泊半径、系泊缆根数及系泊点空间布置 4 类关键参数对平台最大偏移量与缆索最大张力的影响规律; 基于 108 组有效仿真数据, 构建反向传播(BP)神经网络模型完成训练与预测, 实现系泊系统关键参数的协同优化设计。[结果]仿真与优化结果显示: 在百年一遇极端海洋工况下, 该系泊系统的缆索最大张力为 10 349.71 kN, 平台最大偏移量为 46.26 m; 在单根系泊缆失效的极端风险工况下, 系统缆索最大张力达 15 432.61 kN, 平台最大偏移量达 88.41 m。[结论]研究成果对于深水圆筒型 FPSO 系泊系统的动态仿真分析具有借鉴意义。

关键词: 圆筒型 FPSO; 神经网络; 水动力分析; OrcaFlex

中图分类号: P751 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.09.19

Optimized Design of Tensioned Mooring System for Cylindrical FPSO

CHEN Xingshang¹, LIAN Zixiang², CHU Bei³, ZHANG Xingpeng¹,
ZHANG Yali¹, MA Yongqi^{1*}

(1. School of Marine Technology and Equipment, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: [Purpose] To address the dual challenges of safety and economy faced by the mooring system of deepwater cylindrical floating production storage and offloading (FPSO) units under the combined action of wind, waves, and currents, it aims to provide technical support for the design and performance assurance of the mooring systems for such units through systematic analysis and optimization methods. [Method] Combined simulation technology of AQWA and OrcaFlex is adopted to conduct simulation analysis on the dynamic response of the FPSO mooring system. A refined numerical model of the wet surface of the cylindrical FPSO is constructed based on the ANSYS Workbench and AQWA platforms, and frequency-domain hydrodynamic characteristic analysis is completed to obtain the platform's hydrodynamic parameters; OrcaFlex software is used to establish a multi-body coupled dynamic model of the platform-mooring system, and through time-domain dynamic analysis, the influence laws of four key parameters-mooring line length, mooring radius, number of lines, and spatial arrangement of mooring

收稿日期: 2025-05-13; 修回日期: 2025-07-20; 录用日期: 2025-08-19

基金项目: 国家自然科学基金会(52231012)

作者简介: 陈兴上(2002—), 男, 本科。研究方向: 海上结构物水动力分析。

通信作者: 马永奇(1991—), 男, 副研究员。研究方向: 深海采矿立管结构力学研究。E-mail: 996418@hainanu.edu.cn

points-on the maximum platform offset and maximum mooring line tension are systematically explored; based on 108 sets of valid simulation data, a back propagation (BP) neural network model is constructed, trained, and used for prediction, thereby realizing the collaborative optimization design of the key parameters of the mooring system. [Result] Simulation and optimization results show that: under the 100-year return period extreme marine conditions, the maximum tension of the mooring lines of this mooring system is 10 349.71 kN, and the maximum platform offset is 46.26 m; under the extreme risk condition of single mooring line failure, the maximum tension of the system's mooring lines reaches 15 432.61 kN, and the maximum platform offset reaches 88.41 m. [Conclusion] The research results have reference significance for the dynamic simulation analysis of mooring systems for deepwater cylindrical FPSO.

Key words: cylindrical FPSO; neural network; hydrodynamic analysis; OrcaFlex

0 引言

圆筒型浮式生产储卸油装置 (Floating Production Storage and Offloading, FPSO) 凭借其优异的运动稳定性、相对较低的建造造价及无须依赖单点系泊系统等技术优势, 已成为深海油气资源开发领域的主流装备之一。目前圆筒型FPSO常用的系泊方式有2种: 1) 单点系泊, 该形式存在国外技术垄断、后期维护成本高、适用于细长船体, 横摇和垂荡问题突出, 易影响设备稳定性^[1]; 2) 多点系泊, 该形式总体造价较低, 且对风浪流的方向敏感性较弱, 平台运动稳定性具备一定优势, 是一种更适用于中国深海油气田开发需求的FPSO系泊形式^[2]。因此, 开展圆筒型FPSO多点张紧式系泊系统的优化设计研究, 对提升系泊性能、降低工程成本、推动我国FPSO系泊技术的国产化替代与工程应用具有重要的理论价值与工程实践意义。

针对圆筒型FPSO的性能优化与系泊设计, 国内外学者已开展大量研究。张会良^[3]以深水圆筒型钻井平台为研究对象, 采用数值计算与物理模型试验结合的方法, 设计并优化张紧式系泊系统。袁柱^[4]以圆筒型FPSO及张紧式系泊系统为对象, 对比2种系泊刚度模型, 提出改进系泊分析方法。CUI等^[5]围绕圆筒型FPSO展开研究, 针对垂向运动幅度大及低频共振问题, 提出阻尼板优化等抑制措施。李达等^[6]建立波浪-圆筒型FPSO-系泊系统时域耦合模型, 发现其低频摇摆响应显著, 提出降低重心及优化垂荡可使摇摆运动下降4%~10%。综上, 尽管国内外学者已针对圆筒型FPSO的平台运动特性、系泊系统分析方法等方面开展了大量研究并取得阶段性成果, 但针对圆筒型FPSO系泊系统的系统性设计优化 (如多参数协同优化、极端工况适应性设计等) 仍存在研究缺陷。

神经网络应用于优化系泊系统研究方面, 国内外学者开展了大量研究。孙丽萍等^[7]针对FPSO三段式系泊线长度优化, 以遗传算法优化底部、顶部锚链长度。许小颖等^[8]以南海铺管船为对象, 用Moses软件获取样本训练反向传播 (Back Propagation,

BP) 神经网络替代时域计算, 再以遗传算法优化抛锚距离与锚链方位角以减小平台位移。ZHAO等^[9]针对深水半潜式平台系泊系统, 提出BPNN-FEM混合方法, 以BPNN预测静态预张力、NARX-BPNN预测动态张力, 优化锚泊半径、方位角等参数。李文华等^[10]针对锚泊优化忽视单根锚链受力的问题, 提出结合遗传算法决策集生成与广义q-ROF-TODIM的模糊决策策略, 优化锚链张力分配。殷启帅等^[11]针对深水半潜式平台张紧式系泊系统, 通过数值软件建立有限元模型并经自动仿真获取样本, 结合BP神经网络-遗传算法优化系泊缆连接坐标、锚点位置及构型参数。但以上研究多聚焦于单一优化目标, 均难以同时满足工程实际中“位移控制、张力安全、成本经济、寿命保障”的多维度需求。

针对上述问题, 本文聚焦于圆筒型FPSO的聚酯缆系泊系统, 围绕选型、设计、环境载荷分析、系泊参数敏感性以及聚酯缆特性与计算分析方法等方面开展系统性研究。通过优化系泊缆的组分、长度、根数、系泊半径、连接位置和锚点位置等关键参数, 结合OrcaFlex等数值模拟工具, 对系泊系统在复杂海洋环境下的力学行为进行分析, 并利用神经网络算法探索降低成本和提高效率的方法。研究旨在提出一种高效、安全、可靠的系泊系统设计方案, 为FPSO在中深水环境中的稳定运行提供技术支持, 推动我国海洋工程技术的进一步发展。

1 海葵号系泊系统介绍

1.1 系泊系统布置

海葵一号圆筒型FPSO系泊系统采用张紧式聚酯缆系泊定位形式, 最优布置方案为12根系泊缆, 整体分为3束, 每束包含4根系泊线, 线束之间夹角为120°, 同一线束内相邻系泊线夹角为2°。单根系泊线采用“锚链-聚酯缆-锚链”组合构型, 整体呈4×3阵列分布见图1, 既保障了受力均匀性, 又能有效应对复杂海况下的环境载荷, 同时避免聚酯缆触底风险。

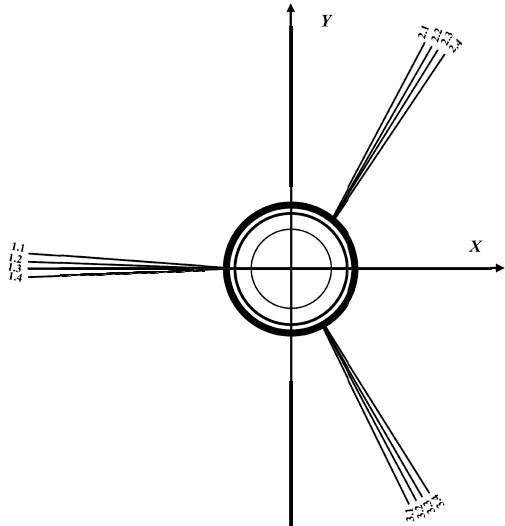


图 1 系泊系统示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Mooring System

1.2 圆筒型 FPSO 及系泊系统参数

圆筒型FPSO及系泊系统参数参考海葵一号的数据, 见表1~表3。

表 1 圆筒型 FPSO 设计参数

Tab. 1 Cylindrical FPSO Design Parameters

参数	数值
船体（水线面处）直径/m	72
水面上最大直径/m	90（距基线高 39m）
主甲板直径/m	83（距基线高 33m）
底部垂荡板直径/m	94
底部垂荡板厚度/m	2.5
设计压载吃水/m	16.5
重心高/m	20
排水量/万 t	7.5

表 2 锚链参数

Tab. 2 Anchor Chain Parameters

参数	数值
直径/mm	160
空气中单位长度质量/(kg/m)	516.3
水中单位长度质量/(kg/m)	449.5
轴向刚度/ MN	2 070
破断强度/ kN	24 281

表 3 聚酯缆参数

Tab. 3 Polyester Cable Parameters

参数	数值
直径/mm	274
空气中单位长度质量/(kg/m)	52.5
水中单位长度质量/(kg/m)	13.5
破断强度/kN	22 600
轴向刚度/MN	565
轴向刚度/MN	270.6

2 分析方法与计算工况

2.1 分析方法

在ANSYS Workbench平台建立圆筒型FPSO的湿表面水动力分析模型, 并基于三维势流理论对平台进行频域水动力分析, 忽略海水黏性对平台运动产生的影响, 并将得到水动力相关结果与已发表论文进行对比。确认计算结果正确后将分析模型和得到的数据导入OrcaFlex软件, 进一步分析风流耦合作用下的平台运动和系泊系统的分析。采用高低刚度法拟合非线性刚度, 并通过改变系泊缆组分、长度、根数, 系泊半径, 系缆与平台连接位置参数及锚点位置等参数进行模拟, 得到不同参数下的模拟结果。将相关结果用BP神经网络进行优化预测得到最优的设计方案, 并进行验证, 具体流程见图2。

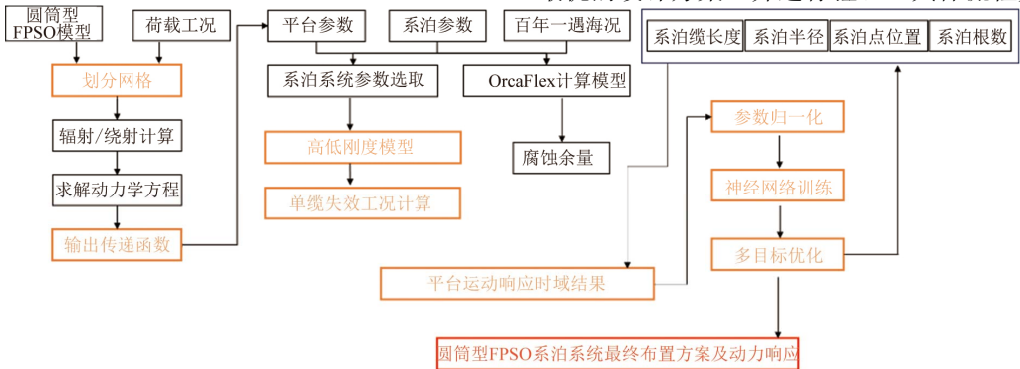


图 2 设计方案流程图

Fig. 2 Design Plan Flowchart

2.2 计算工况

本文所适应的海况条件是环境参数为百年一遇

工况, 设置作业海域水深324 m, 波和流同向。波浪参数: 取JONSWAP谱, $\gamma=2.4$, 有义波高 $H_s=13.7$ m,

周期 $T_p=15.1$ 。海面平均风速为45.1 m/s,不同深度对应的海流速度见表4。在百年一遇海况基础上,分别断开12根系泊缆(编号1.1~1.4、2.1~2.4、3.1~3.4),分析单缆失效后系泊系统的张力分布与平台偏移特性,验证系统冗余安全性。

表4 海流速度分布

Tab. 4 Distribution of Ocean Current Velocity

水深/m	流速/(m/s)
1.0	2.49
32.4	2.25
64.8	2.01
97.2	1.78
129.6	1.54
162.0	1.30
194.4	1.01
226.8	0.95
259.2	0.89
291.6	0.83
324.0	0.77

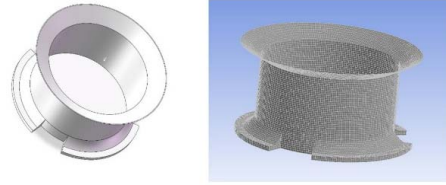
3 圆筒型 FPSO 水动力分析及系泊系统设计

3.1 圆筒型 FPSO 水动力分析

基于三维势流理论在AQWA中对圆筒形FPSO进行了水动力特性分析。分析了波浪方向从 0° 到 180° ,间隔为 15° 以及波浪频率从0.14 rad/s增至2.00 rad/s的过程中6个自由度的幅值响应算子、阻尼系数、附加质量和1阶波浪力载荷传递函数。

3.2 圆筒型 FPSO 湿表面模型建立

在Solidworks软件建立模型后导入ANSYS Workbench平台进行前处理。包括对模型的湿表面和网格划分,为满足计算精度要求,网格划分以六面体为主见图3。



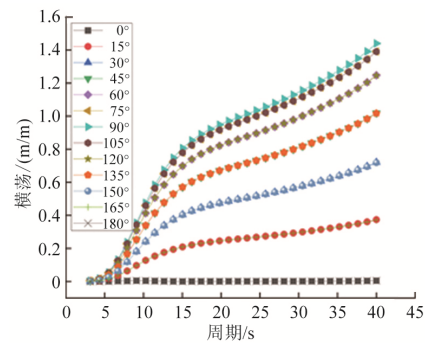
(a) FPSO 模型 (b) 网格划分

图3 FPSO模型和网格示意

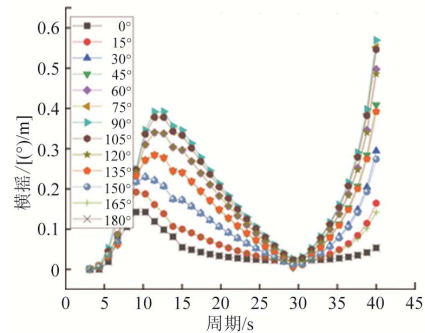
Fig. 3 FPSO Model and Grid Schematic

3.2.1 1阶响应幅值算子

分析圆筒型FPSO在以 15° 为间隔,从入射波在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 不同方向下6个自由度的运动响应幅值算子,各方向结果见图4~图6。



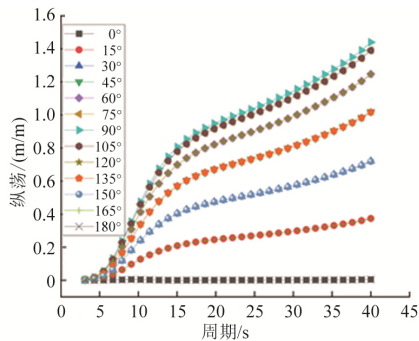
(a) 横荡 RAO



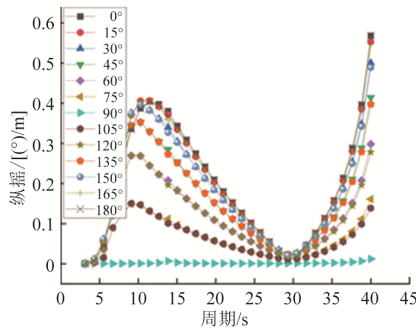
(b) 横摇 RAO

图4 横荡和横摇 RAO

Fig. 4 Sway and Roll RAO



(a) 纵荡 RAO



(b) 纵摇 RAO

图5 纵荡和纵摇 RAO

Fig. 5 Surge and Pitch RAO

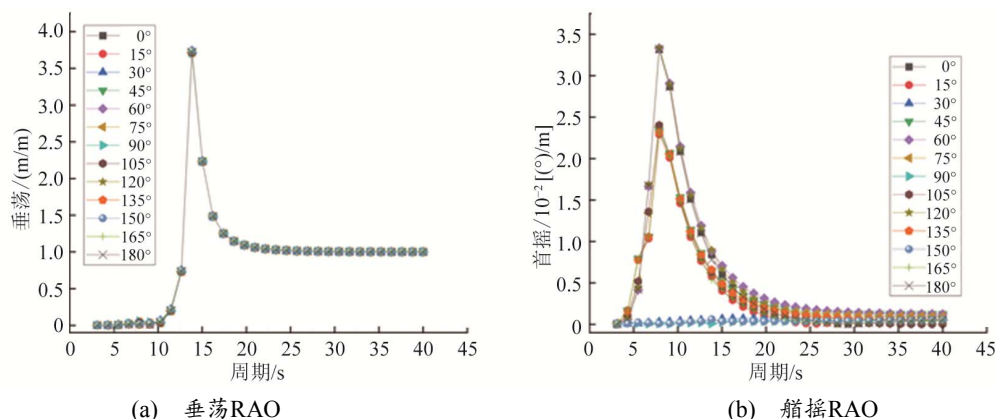


图6 垂荡和首摇 RAO

Fig. 6 Heave and Yaw RAO

圆筒型 FPSO 的波浪频域响应 (Response Amplitude Operator, RAO) 特性分析可知: 在位移响应方面, 横荡与纵荡位移随波浪周期的增加呈现逐步递增趋势, 而垂荡位移则在波浪周期约为 10 s 时, 因结构与波浪的共振效应出现显著的响应幅值峰值; 在姿态角响应方面, 横摇、纵摇及首摇均在其固有频率 (约 0.5 rad/s~1.0 rad/s) 受共振机制驱动, 产生幅值突出的响应峰值。此外波浪与结构间的相对相位关系对上述各类运动的响应幅值具有明确的调制作用。综合来看, 共振区间内的响应放大效应, 以及长周期波浪对横荡、纵荡位移的激发作用, 是该模型 RAO 响应分析中尤为关键的关注要点。

3.2.2 附加质量和辐射阻尼

分析流体作用在浮式结构物上的动力和力矩包含与浮式结构运动加速度成一定比例的附加质量和与浮式结构运动速度成一定比例但方向相反的辐射阻尼见图7。图7(a)附加质量与图7(b)辐射阻尼的变化显示, 纵荡、横荡的附加质量和辐射阻尼对频率更为敏感, 在约 1.0 rad/s 附近因流体与结构运动的共振效应出现峰值; 垂荡的附加质量与辐射阻尼则整体变化平缓且数值远小, 反映其与流体相互作用更弱, 这些水动力特性为浮体结构的运动响应预报及设计优化提供了依据。

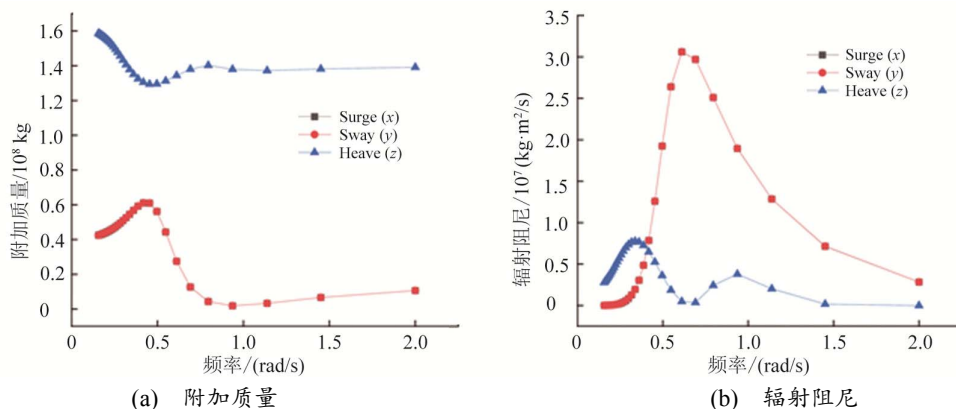


图7 横荡、纵荡、垂荡运动

Fig. 7 Sway, Surge, Heave Motions

3.2.3 1 阶波浪力与波浪力矩载荷传递函数

计算圆筒型 FPSO 在不同波浪上的 1 阶波浪力与波浪力矩载荷见图8~图10。各转动类自由度的 1 阶波浪力矩随频率均呈“先升后降”的趋势, 但特性存在差异: 横摇、纵摇的 1 阶波浪力矩数值量级最大, 峰值集中在 0.5 rad/s~1.0 rad/s, 波浪对其转动激励最强; 横荡、纵荡的力矩峰值也处于该频率区间但

量级稍小; 垂荡力在低频段峰值显著且随频率升高快速衰减、整体量级最小; 首摇力矩峰值约 1.0 rad/s, 量级介于中间; 此外, 波浪入射或结构姿态角度对各自自由度力和力矩的峰值高度与分布形态影响明显, 这些规律为海洋结构物的运动响应预报和设计优化提供了关键依据。

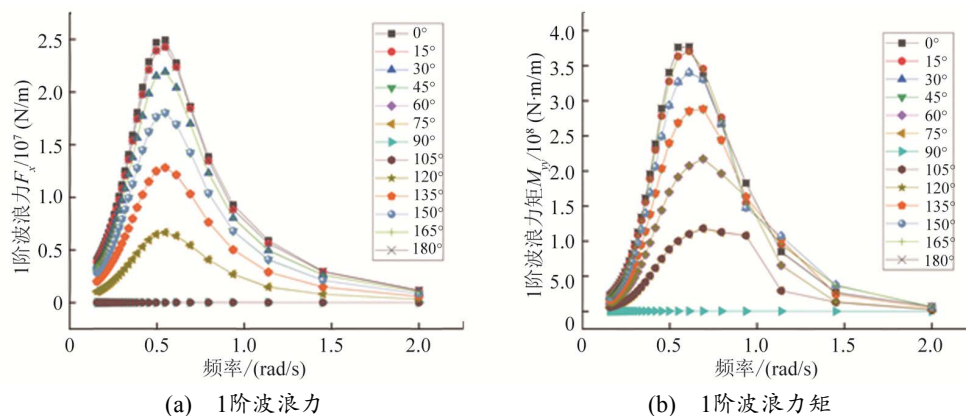


图8 横荡运动

Fig. 8 Sway Motion

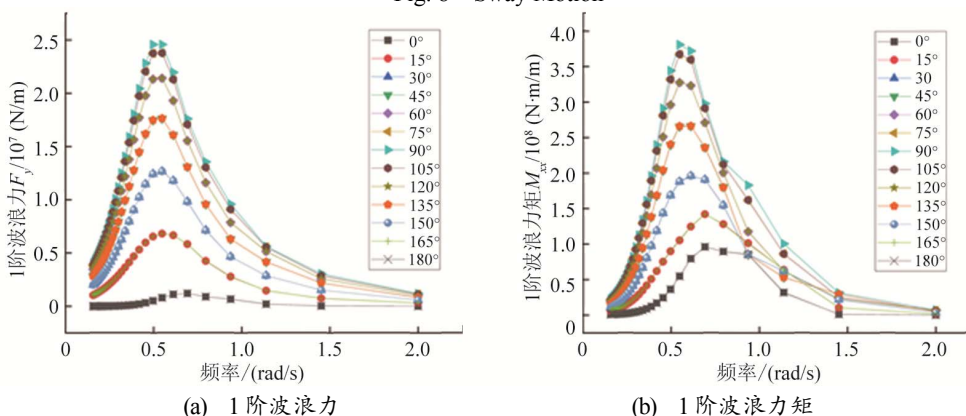


图9 纵荡运动

Fig. 9 Surge Motion

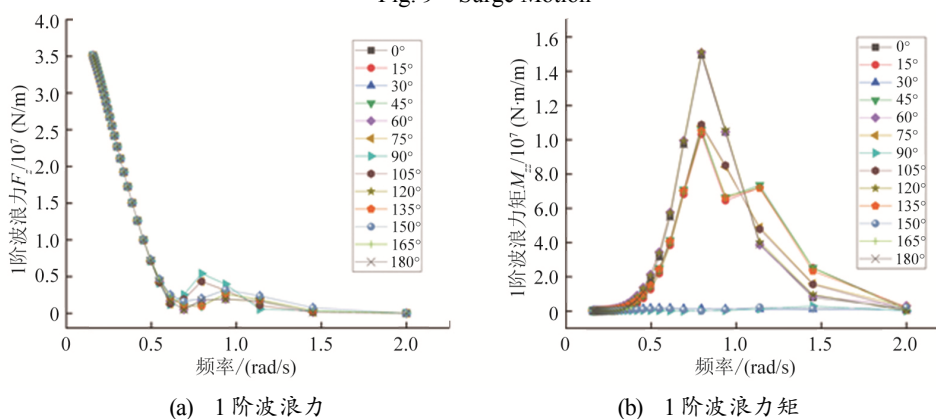


图10 垂荡运动

Fig. 10 Heave Motion

3.3 圆筒型FPSO系泊系统设计方案

深远海中的圆筒型FPSO受到高海况的作用，其动力学特性建模需要针对高海况特点，充分考虑环境因素的影响。因此，依据设计要求提供的环境参数进行环境建模。结合研究的实际需要，将AQWA模型和频域水动力计算结果导入OrcaFlex软件，在OrcaFlex中对平台、系泊系统和立管进行时域耦合动力分析，随后在OrcaFlex软件中设置平台的风载系数、流载系数以及环境参数，建立系泊缆模型以

进行仿真计算分析，其整体模型见图11。

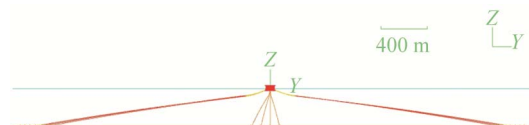


图11 OrcaFlex中整体模型效果图

Fig. 11 Overall Model Rendering in OrcaFlex

3.3.1 系泊缆建模

为研究圆筒型FPSO的系泊系统在极端情况下

的可靠度, 本文以百年一遇的工况作为试验工况, 并结合系统实际工作情况来配置环境参数。本次12根系泊缆采用锚链和聚酯缆组合构型。故我们在OrcaFlex中将系泊缆分成锚链、聚酯缆2个类, 分开建模, 在创建系泊缆单元line时, 再将其按不同的长度组合。选取一组系泊参数组合作为初始的系泊系统。该平台采用张紧式聚酯缆系泊系统定位形式, 系统总共分成3束, 每束由4根系泊线组成。线束之间的夹角为 120° , 同一组系泊线束相邻线之间的夹角为 2° , 每条系泊线都由锚链-聚酯缆-锚链组成, 单根系泊线组成成分见图12。

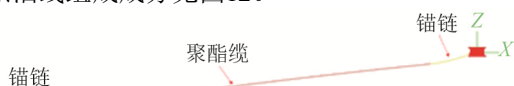


图 12 单根系泊线组成

Fig. 12 Composition of a Single Mooring Line

考虑锚链 8 mm 腐蚀余量, 设置锚链直径为 152 mm、空气中单位长度质量 516.3 kg/m、水中单位长度质量 449.5 kg/m、轴向刚度为 2 070 MN/m、破裂强度为 24 281 kN、在完整状态下安全系数为 1.67、单缆失效状态下为 1.25。聚酯缆直径 274 mm、空气中单位长度质量 52.5 kg/m、水中单位长度质量 13.5 kg/m、破裂强度为 22 600 kN, 采用高低刚度法拟合非线性刚度, 其基本原理是通过设置高刚度 (565 MN) 和低刚度 (270.6 MN) 2 个阶段, 模拟聚酯缆在不同张力水平下的刚度变化: 低张力时表现为低刚度, 高张力时表现为高刚度。该方法能更准确地反映聚酯缆在实际受力过程中的非线性行为, 提高仿真精度, 尤其在极端工况下的张力预测更为可靠。在完整状态下取安全系数为 1.67、单缆失效状态下为 1.25。

3.3.2 仿真结果与讨论

为提高后续试验数据选取合理性, 首先在OrcaFlex中建立基础模型并开展初步仿真, 设置仿

真起始时间为-24 s (保证波浪与圆筒型FPSO系泊系统作用趋于稳定)、波浪开始作用时间为0、总仿真时间为3 600 s, 同时采用时域耦合分析方法, 结合系泊缆非线性动态特性计算平台系泊系统动力响应, 探究系泊参数对平台水平偏移量与系泊缆张力动力效应的影响。

如图13所示, 在固定系泊半径情况下, 当系泊缆长度不足时, 系泊缆长度缩短导致最大张力增加, 在环境载荷作用下易引发张力峰值升高, 甚至超出设计阈值; 反之, 若系泊缆长度过长, 平台在风浪流载荷下的水平偏移量将增加, 可能超出作业允许的偏移范围。如图14所示, 系泊半径的确定本质上是系统刚度与强度之间的折中设计: 增大半径将降低系泊系统刚度, 导致浮式平台水平位移增加, 但同时可降低系泊缆顶端张力; 反之, 减小半径虽能有效约束平台偏移, 却会使顶端张力增大。如图15所示, 在不同系泊半径与缆长的组合下, 系泊点位置会改变最大张力与偏移量的分布。如图16所示, 当系泊缆数量增加时, 可有效提升系泊系统水平刚度, 抑制平台在风浪流载荷下的偏移量, 同时降低单缆所承受的平均张力与动态载荷幅值, 使系统抗极端载荷能力增强; 然而, 缆绳数量增加会导致锚点布置、系泊缆制造及安装成本上升, 故工程设计中需在平台运动控制精度、缆索张力安全阈值与经济性之间寻求平衡。圆筒型FPSO的系泊系统设计应同时兼顾安全性及经济性, 优先匹配系泊缆长度和系泊半径, 同时合理选定系泊缆根数及确定系泊点位置, 实现参数协同, 避免单一参数顾此失彼。

基于上述结果, 本设计针对各个方向风浪环境, 系统研究了系泊缆数量、系泊点布局、系泊半径及缆长等参数组合对系泊系统动力学响应的影响规律。基于高低刚度理论框架, 通过构建参数化分析模型, 量化评估了不同刚度配置下平台水平偏移与缆索张力的耦合响应特性, 旨在通过多参数协同优化算法求解满足目标函数的最优设计解集。

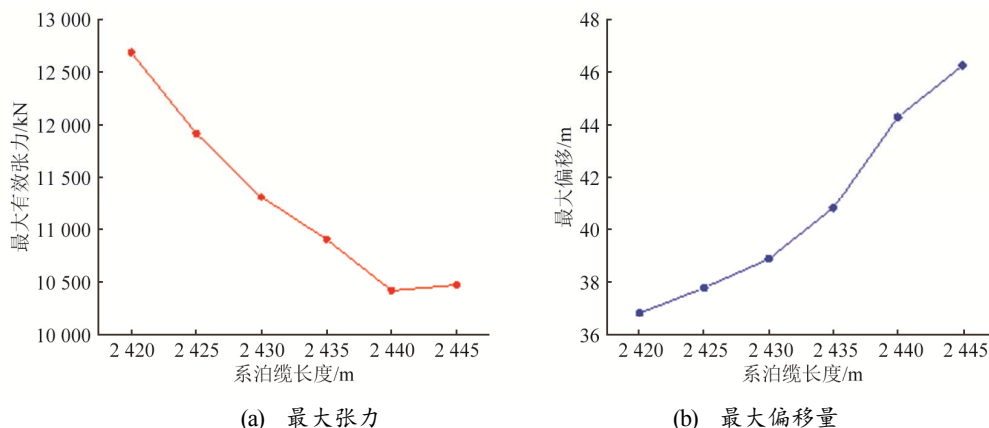


图 13 系泊半径 2 440 m 时缆长影响

Fig. 13 Effect of Cable Length at a Mooring Radius of 2 440 m

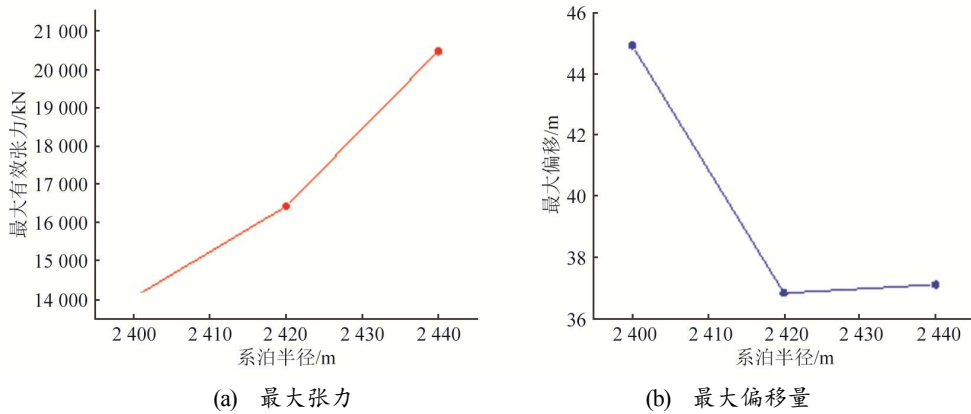


图 14 缆长 2 400 m 时系泊半径的影响

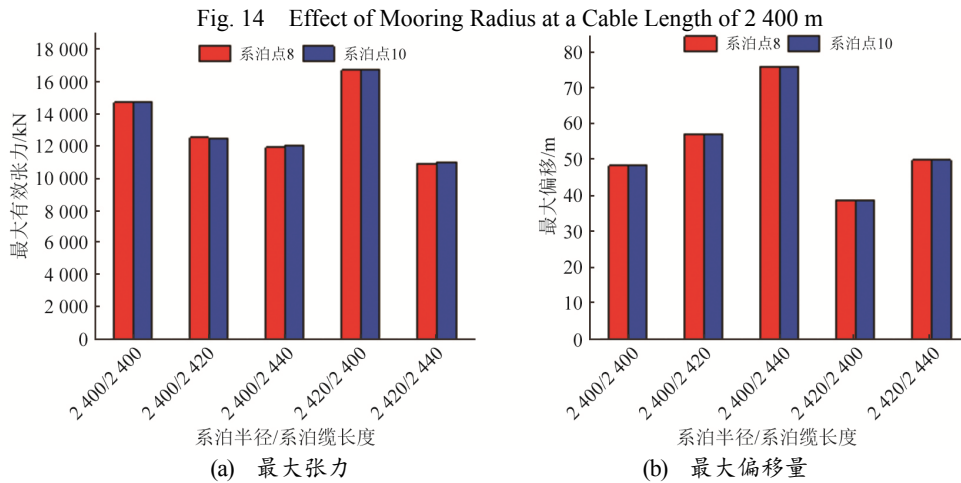


图 15 不同系泊半径与缆长组合下系泊点位置的影响对比

Fig. 15 Comparison of the Effect of Mooring Point Position Under Different Combinations of Mooring Radius and Cable Length

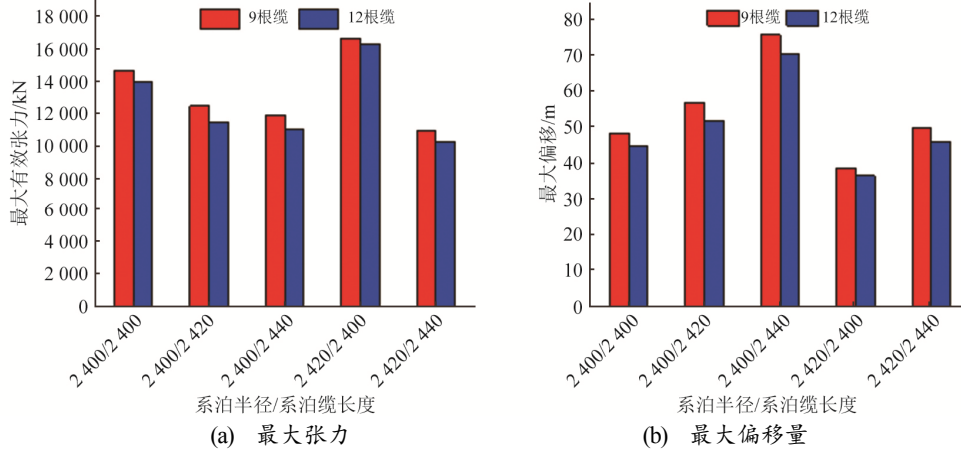


图 16 不同系泊半径与缆长组合下系泊缆根数的影响对比

Fig. 16 Comparison of the Effect of the Number of Mooring Lines Under Different Combinations of Mooring Radius and Cable Length

4 基于神经网络优化设计分析

4.1 基于 BP 神经网络的系泊系统优化

4.1.1 数据收集

考虑系泊缆参数变量间具有关联性,因此选取4个参数作为待优化变量,包括:系泊缆根数、系泊半径、系泊缆长度、系泊点位置。在建模分析阶段,采用控制变量法,并滤除掉无效数据后,共108组。

4.1.2 BP 神经网络优化流程

选用BP神经网络研究。BP网络包括3种类型的层:用于向网络发送数据的输入层,用于生成结果的单个或多个隐藏层,以及用于提供结果的输出层。

神经网络的训练流程见图17,5个输入参数:系泊缆根数 G 、系泊半径 R 、缆长 L 、波向角度 A 和系泊点位置 N 。输出参数是最大张力 T 和最大偏移量 D 。

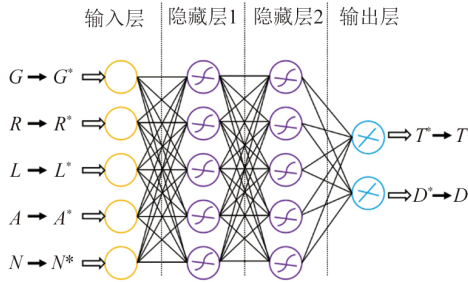


图 17 BP 神经网络训练流程

Fig. 17 BP Neural Network Training Flow Chart

在训练之前, 对输入和输出变量进行归一化使得落在 $[-1,1]$, 以避免各种参数之间差异显著的不利影响。归一化通过 ([1]) 方式进行

$$x_k^* = \frac{x_k - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: x_k 为某个输入参数的原始值; x_k^* 为 x_k 经过归一化处理后得到的标准化变量; $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为参数的最小值和最大值。

从输入层通过隐藏层到输出层, 归一化的 G^* , R^* , L^* , A^* 和 N^* 向前传播。在隐藏层1、层2和输出层内的每个神经元处, 输出 T^* 和 D^* 。再对输出变量重新归一化之后, 即获得最大张力 T 和最大偏移量 D 。

隐藏层和神经元的数量对神经网络的性能有重

要的影响。神经元和隐藏层越少, 模型拟合越差, 精度越低。过多的隐藏层或神经元会使模型变得非常复杂, 可能导致过拟合的现象, 也即当使用训练集时, 网络可以表现得极好, 但是当计算新的数据集 (即未知工况) 时却表现很差。因此, 需要比较各种具有不同隐藏层和神经元数量的神经网络结构, 以确定隐藏层和神经元的最佳数量。在本文中, 数据量小, 计算不会过于复杂, 因此采用双隐层架构。

4.2 神经网络训练

将上述108组的试验结果导入MATLAB中的BP神经网络模型中, 并训练得到对应的BP神经网络。

对于回归型神经网络, 一般以决定系数 R^2 作为拟合效果的评价指标, $R^2 > 0.95$ 的模型满足精度要求, 越接近于1表示拟合效果越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: y_i 为测试集的真实值; $\bar{y}_i$ 为真实值的平均值; $\hat{y}_i$ 为测试集的预测值。

通过神经网络训练回归, 训练结果见图18和图19, 结果显示训练集、验证集的 R^2 均在94%以上, 见图20和图21。因此本设计BP神经网络训练良好、预测精度高。

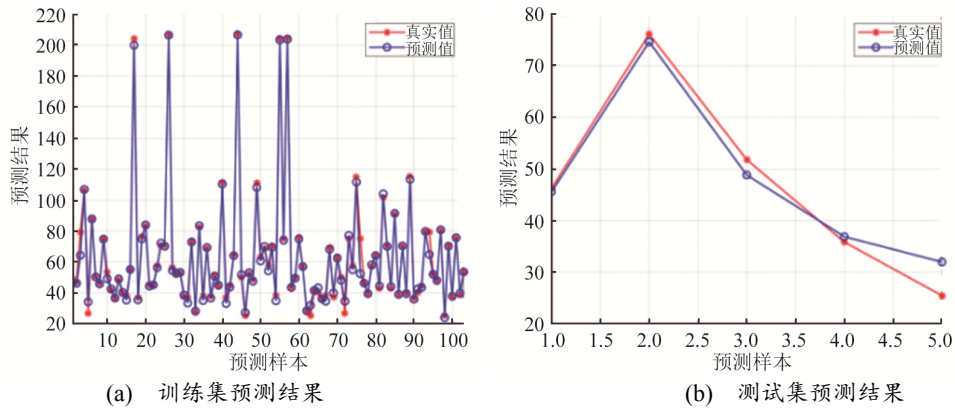


图 18 最大张力训练集与测试集预测结果对比

Fig. 18 Maximum Tension Training Set and Test Set Prediction Results Comparison

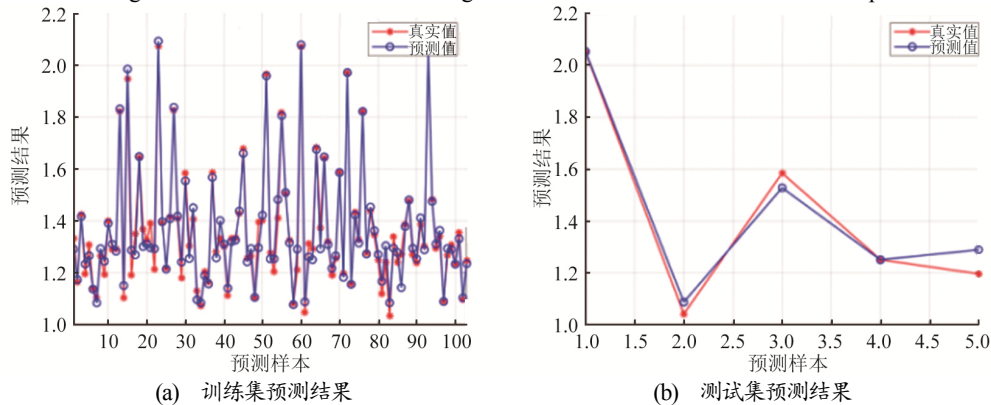


图 19 最大偏移量训练集与测试集预测结果对比

Fig. 19 Maximum Offset Training Set and Test Set Prediction Results Comparison

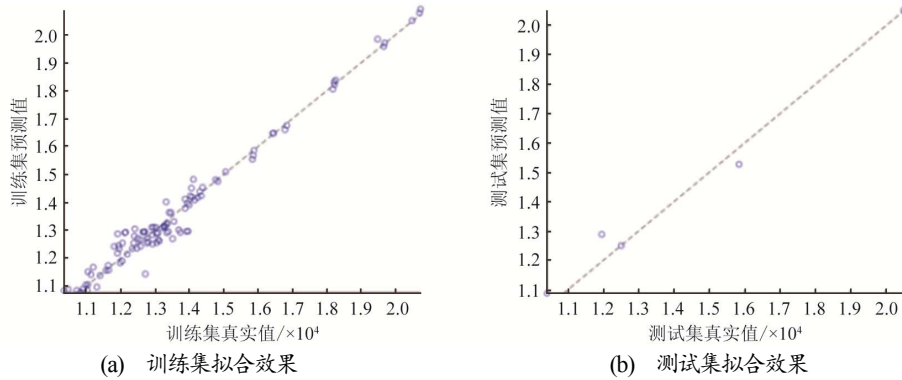


图 20 最大张力预测精度

Fig. 20 Maximum Tension Prediction Accuracy Chart

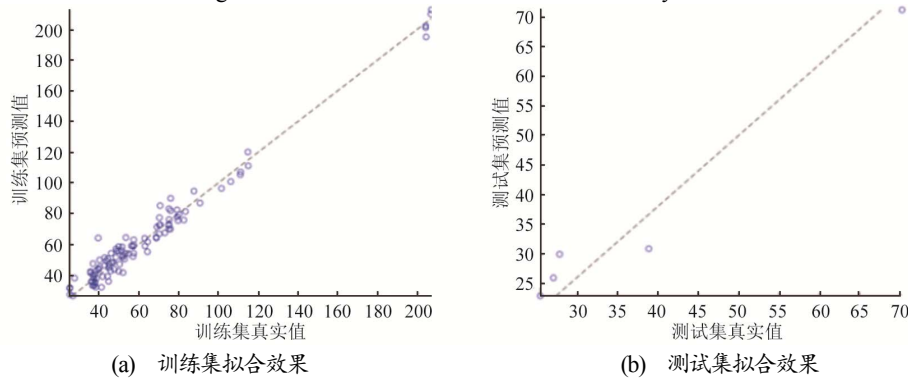


图 21 最大偏移量预测精度

Fig. 21 Maximum Offset Prediction Accuracy Chart

4.3 最优设计方案及验证

4.3.1 多目标优化参量选择

对系泊系统的构型、悬挂位置以及系泊半径等关键参数进行了优化设计。考虑到锚点位置可以通过系泊半径和方位角之间的几何关系精确计算得出,因此未将其列为独立的设计变量。最终确定的设计变量包括3个关键参数:1)系泊缆配置方案(共设置3组);2)单根系泊缆的长度;3)系泊半径。

在优化过程中设置了双重约束条件:一方面限制了各设计变量的合理取值范围;另一方面对动态缆的许用张力、平台最大允许偏移量以及聚酯缆避免触底等关键性能指标进行了严格限制。基于竞赛要求的安全系数标准并结合仿真分析结果,为各设计变量制定了具体的取值范围,详细数据参数见表5。

表 5 参量范围

Tab. 5 Parameter Range

参数	数值
系泊半径/m	2 400、2 420、2 440
系泊缆长度/m	2 400~2 460
最大张力/kN	<13 532.934 13
最大偏移量/m	<97.2

4.3.2 优化结果验证

基于已完成训练且拟合精度满足研究要求的BP神经网络模型,首先通过该模型对预设的系泊系统设计参数数据集计算,构建起系泊缆根数、系泊半径、系泊缆长度、波向角度与平台最大偏移量、系泊缆最大张力间的非线性映射关系。在此基础上,进一步生成多组覆盖关键参数合理取值范围的系泊系统候选设计方案,利用训练好的神经网络模型对各组方案对应的平台动态响应(最大偏移量、系泊缆最大张力)进行预测。将所有候选方案预测结果与预设的平台安全性技术要求(如平台位移限值、系泊缆张力安全系数阈值等)进行逐一比对,最终从符合要求的方案中筛选出综合性能最优的系泊配置。最优配置对应的系泊缆最大张力10 349.708 98 kN,平台最大偏移量为46.255 94 m,完全满足预设的各项安全性技术要求;最优方案的详细系泊参数见表6。

表 6 最优系泊缆参数

Tab. 6 Optimal Mooring Line Parameters

参数	数值
系泊缆整体长度/m	2 420
系泊半径/m	2 440
系泊点位置/m	8
系泊缆根数	12

4.3.3 单缆失效分析

根据最优解参数进行单缆失效分析,在OrcaFlex中分别断开系泊缆对FPSO在复杂海洋环境下的力

学行为进行分析,结果见表7。结果表明,在单缆失效情况下,系泊系统最大张力为15 432.612 30 kN,平台最大偏移量为88.411 87 m,满足安全系数规范。

表 7 单缆失效结果

Tab. 7 Single Mooring Line Failure Result

失效缆名称	系泊缆根数	系泊半径/m	缆长/m	波向/(°)	系泊点位置/m	最大张力/kN	最大偏移量/m
1.1	12	2 420	2 440	0	8	13 092.701 17	78.843 01
1.2	12	2 420	2 440	45	8	14 310.274 41	74.726 76
1.3	12	2 420	2 440	45	8	14 135.004 88	76.990 41
1.4	12	2 420	2 440	0	8	12 100.345 70	55.433 04
2.1	12	2 420	2 440	45	8	12 097.107 42	82.251 40
2.2	12	2 420	2 440	45	8	11 177.127 93	83.059 86
2.3	12	2 420	2 440	45	8	15 432.612 30	88.411 87
2.4	12	2 420	2 440	45	8	12 175.205 08	84.642 15
3.1	12	2 420	2 440	90	8	11 402.236 33	62.377 15
3.2	12	2 420	2 440	90	8	11 327.135 74	61.896 61
3.3	12	2 420	2 440	90	8	11 482.389 65	62.904 39
3.4	12	2 420	2 440	90	8	11 258.552 73	61.474 76

5 结论

本论文基于OrcaFlex软件模拟了圆筒形 FPSO 系泊系统在风浪耦合作用下不同设计参数组合对应的动态响应数据;再将该数据集用于BP神经网络预测模型的训练与验证,最终在百年一遇作业环境设计要求的约束下,实现系泊系统安全性与经济性的协同优化。结果表明,在BP神经网络模型拟合精度满足要求的基础上,通过该模型预测得到的系泊系统最优设计方案参数如下:系泊缆根数12根、系泊缆长度2 420 m、系泊半径2 440 m、系泊点数量8个。与海葵一号FPSO现役系泊系统相比,该最优方案中系泊缆长度缩短150 m,显著提升了系统的经济性。

参考文献:

[1] 吴家鸣. FPSO 的特点与现状[J]. 船舶工程, 2012, 34(增刊 2): 1-4.
WU J M. Distinguishing Feature and Existing Circumstances of FPSO[J]. Ship Engineering, 2012, 34(Suppl. 2): 1-4.

[2] 彭小佳, 张广磊, 李俊汲. 深海圆筒型 FPSO 总体设计[J]. 船海工程, 2024, 53(3): 90-94.
PENG X J, ZHANG G L, LI J J. General Design of the Cylindrical FPSO in Deep Water[J]. Ship & Ocean Engineering, 2024, 53(3): 90-94.

[3] 张会良. 深水圆筒型钻井平台南海海域水动力性能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
ZHANG H L. Hydrodynamic Performance Analysis of a Deepwater Cylindrical Drilling Platform in the South China Sea[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,

2019.

[4] 袁柱. 圆筒型 FPSO 张紧式系泊运动安全性能评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
YUAN Z. Safety Assessment of Cylindrical FPSO With Tensioned Mooring Systems [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.

[5] CUI Y, LI Y, LI G, et al. Dynamic Response and Nonlinear Resonance of Cylindrical FPSO with a Ring Groove Considering Time-Varying Restoring Stiffness [J]. Ocean Engineering, 2025, 325: 120857.

[6] 李达, 易丛, 付升雷. 圆筒型 FPSO 运动响应特性与抑制方法[J]. 中国海上油气, 2025, 37(1): 184-193.
LI D, YI C, FU S L. Motion Response Characteristics and Suppression Methods of Cylindrical FPSO[J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(1): 184-193.

[7] 孙丽萍, 张伟, 艾尚茂. 基于神经网络和遗传算法的系泊线长度参数优化[J]. 船舶工程, 2015, 37(4): 88-91.
SUN L P, ZHANG W, AI S M. Mooring Length Optimization Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 37(4): 88-91.

[8] 许小颖, 周盼, 王宽. 基于神经网络和遗传算法的系泊优化设计[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(5): 97-103.
XU X Y, ZHOU P, WANG K. Mooring Optimization Design Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(5): 97-103.

(下转第 192 页)