

海洋钢结构的抗震性能与设计优化

曹 聪

天津修船技术研究所 天津 300456

摘要: 海洋钢结构作为海洋工程的关键载体,其抗震性能直接关乎结构在极端海况下的安全性与可靠性。海洋环境中的地震荷载具有复杂性、随机性及与海流、波浪等荷载的耦合作用,给抗震设计带来巨大挑战。本文系统阐述了海洋钢结构抗震性能的影响因素,包括材料特性、结构体系、基础形式及海洋环境作用等,并针对性提出设计优化策略,如性能化设计方法、结构冗余度增强、材料性能提升及数据库驱动的智能设计,旨在为海洋工程抗震设计提供理论支持与技术参考。

关键词: 海洋钢结构; 抗震性能; 设计优化

1 海洋钢结构概述

1.1 海洋钢结构的类型

海洋钢结构是指应用于海洋环境中的各类钢制结构体系,根据使用场景与功能需求,可划分为以下主要类型;固定式平台:如导管架平台、重力式平台,用于油气资源开发,需承受复杂海洋载荷(风、浪、流、冰等);浮式平台:包括半潜式平台、浮式生产储卸油装置(FPSO)、张力腿平台(TLP)等,适用于深水油气田开发,强调动态稳定性与耐波性;海洋工程船舶:如起重船、铺管船、钻井船,需具备高机动性与特种作业能力;跨海桥梁与隧道结构:如港珠澳大桥、胶州湾跨海大桥,需解决超长跨度、深水基础及抗腐蚀难题;海上风电结构:包括单桩基础、导管架基础及漂浮式风电平台,需适应风浪联合作用与极端气候条件;人工岛与防护结构:如防波堤、围堰结构,用于海岸防护与港口建设,强调抗冲击与长期耐久性。

1.2 海洋钢结构的结构特点

海洋钢结构的设计需综合考虑海洋环境的特殊性,其核心特点包括:第一,复杂载荷环境。需同时承受波浪、海流、风、地震、冰载荷及温差应力,载荷组合复杂且动态变化;第二,高耐久性要求。长期暴露于高盐雾、高湿度及海洋生物腐蚀环境,需采用防腐涂层、阴极保护等综合防护技术;第三,大尺度与模块化设计。为适应远洋运输与现场安装,结构常采用分块预制、海上拼接方式,需解决焊接质量与疲劳控制难题^[1];第四,动态稳定性。浮式结构需通过压载系统、系泊系统或动态定位系统(DP)维持平衡,需优化水动力性能与阻尼设计;第五,疲劳与断裂控制。波浪长期作用易引发结构疲劳裂纹,需通过细节设计(如焊缝优化、节点加强)与定期检测延长寿命;第六,冗余度与安全性。采

用多道防线设计(如冗余构件、逃生通道),确保极端工况下人员与设备安全;第七,环境适应性。需考虑极地冰区抗冰设计、热带海域抗台风设计,以及深水高压环境下的材料性能退化问题。

2 海洋钢结构抗震性能影响因素分析

2.1 结构设计因素

海洋钢结构的抗震性能与其设计参数密切相关,结构形式与刚度分布:如导管架平台的刚度集中可能导致局部应力集中,而浮式平台的柔性设计需平衡刚度与阻尼特性;节点构造与连接方式:焊缝质量、螺栓连接强度及节点疲劳设计直接影响地震荷载下的传力路径有效性;冗余度与损伤容限:通过增加冗余构件(如备用支撑)可降低单点失效风险,但需平衡结构重量与经济性;阻尼与能量耗散机制:采用粘滞阻尼器、调谐质量阻尼器(TMD)或摩擦阻尼装置可提升结构耗能能力;基础-结构相互作用:深水环境中的桩土耦合效应、浮式平台的系泊系统刚度均会影响结构动力响应特性。

2.2 材料性能因素

材料特性对海洋钢结构抗震性能的影响主要体现在;高强钢可减小构件截面尺寸,但需确保低温韧性(如低温环境下的Charpy冲击功要求);循环荷载下钢材的裂纹扩展速率(da/dN)需满足设计寿命要求,焊接接头需通过疲劳等级(如FAT等级)验证;海洋环境中的腐蚀会降低材料强度与延性,需考虑长期性能退化对抗震能力的影响;极地海域需采用低温韧性钢材(如API5LX80级管线钢),避免低温脆断风险;地震作用下钢材进入塑性阶段后,其应力-应变关系(如Ramberg-Osgood模型)需纳入动力分析。

2.3 地震特性因素

地震作用本身的复杂性对海洋钢结构抗震性能影响

显著；地震加速度峰值（PGA）、卓越周期与结构自振周期的匹配关系决定动力放大效应；多维地震波（如水平+竖向）作用下，结构扭转效应可能导致局部破坏；长历时地震可能导致结构累积损伤，需通过能量平衡分析评估疲劳破坏风险；近场地震的脉冲效应（如速度脉冲）对长周期结构（如FPSO）的冲击更显著；软土地场可能放大地震动，而硬岩场地则可能引发高频振动，需通过场地响应分析优化设计。

2.4 海洋环境因素

海洋环境对海洋钢结构抗震性能的附加影响包括：海流与波浪耦合作用：地震期间海流与波浪的联合作用可能加剧结构振动，需通过水动力-地震耦合分析评估；冰荷载与地震叠加：极地海域冰激振动与地震荷载的叠加效应可能超出设计预期，需开展多荷载组合分析；腐蚀疲劳：海水与地震循环荷载的协同作用会加速疲劳裂纹扩展，需采用腐蚀疲劳寿命预测模型；温度与湿度变化：极端温度（如寒区低温）与湿度波动可能影响材料性能与连接可靠性；海洋生物附着：贝类、藤壶等生物附着可能改变结构自振频率，需考虑长期监测与维护策略。

3 海洋钢结构抗震性能评估方法

3.1 数值模拟技术

数值模拟是海洋钢结构抗震性能评估的核心手段，主要方法包括：有限元分析（FEA）。通过建立结构精细化模型（如三维实体单元、壳单元），考虑材料非线性（如弹塑性本构）、几何非线性（如大变形）及接触非线性（如桩土界面），实现地震荷载下的动力响应预测；时程分析法。输入实际地震波或人工合成地震动，通过直接积分法（如Newmark- β 法）求解结构运动方程，获取位移、加速度、内力等时程响应，评估结构最大变形与能量耗散；水动力-地震耦合分析。结合Morison方程或势流理论，考虑海流、波浪与地震的联合作用，评估浮式平台或跨海桥梁的动态稳定性；多尺度建模。对关键节点（如焊缝、连接件）采用精细网格，对整体结构采用简化模型，通过子结构法实现计算效率与精度的平衡；概率性分析。结合蒙特卡罗模拟或拉丁超立方抽样，考虑材料参数、地震动强度等不确定性，评估结构失效概率与易损性^[2]。

3.2 试验验证方法

试验验证是确保数值模拟可靠性的关键环节，通过缩尺模型或足尺模型在地震模拟振动台上施加地震动，直接观测结构动力响应（如加速度、位移），验证数值模型的准确性；结合数值模拟与物理测试，通过伺服液压系统施加伪静力荷载，结合实际地震波输入，模拟结

构在地震作用下的渐进损伤过程；利用离心机模拟重力场，研究深水环境中的土-结构相互作用（SSI）及地震波传播特性，评估基础与结构的协同工作性能；针对焊缝、螺栓连接等关键部位开展疲劳试验、低周反复加载试验，验证节点抗震承载力与延性；通过现场监测数据（如加速度传感器、应变片）反演结构动力特性，校准数值模型参数。

3.3 性能评估指标

性能评估指标需量化海洋钢结构在地震作用下的安全冗余与损伤容限能力，主要指标包括：位移指标：层间位移角（InterstoryDriftRatio）、层间位移角（DriftRatio），用于评估结构变形是否超过极限状态（如0.5%-2%范围需根据结构类型调整）；能量耗散能力：通过滞回曲线面积评估结构塑性变形耗能效率，需满足设计规范中“等效粘滞阻尼比”要求；损伤指标：采用Park-Ang损伤模型量化构件塑性变形与能量耗散对结构损伤的累积效应，评估剩余承载力；冗余度指标：通过结构拓扑分析（如连通性分析）评估冗余构件对整体抗震性能的贡献；经济性指标：结合全生命周期成本（LCC），平衡抗震性能与建设、维护费用，优化设计方案^[3]。

4 海洋钢结构抗震设计优化策略

4.1 基于性能的抗震设计方法应用

基于性能的抗震设计是当前海洋钢结构抗震设计的前沿方法，其核心在于通过量化结构在不同地震强度下的性能目标，实现抗震设计的精细化控制与全生命周期风险管理。针对海洋钢结构的特殊性（如导管架平台、FPSO、跨海桥梁等），需结合工程重要性、使用功能与经济性，制定“正常使用”“立即使用”“生命安全”三级性能目标。通过Pushover分析生成能力谱曲线，结合地震反应谱生成需求谱曲线，通过二者交点评估结构抗震能力是否满足性能目标。需特别注意海洋环境中的特殊荷载（如海流、波浪）对需求谱的影响，必要时引入水动力-地震耦合分析修正需求谱参数。结合概率性地震需求模型（PSDM）与结构易损性曲线，计算结构在不同地震强度下的失效概率与损失期望值。通过增量成本-效益分析（ICBA），平衡抗震性能提升与全生命周期成本（包括建设、维护、修复与停产损失）。

4.2 结构体系优化设计

结构体系优化是提升海洋钢结构抗震性能的核心途径，需从拓扑结构、力学性能与功能需求进行系统性优化。（1）冗余度增强与多路径传力设计：通过增加备用构件（如冗余支撑、双路径传力体系）与关键节点

冗余设计,降低单点失效风险。(2)阻尼与能量耗散机制的集成应用:结合粘滞阻尼器、调谐质量阻尼器(TMD)、摩擦阻尼装置与屈曲约束支撑(BRB),实现多级能量耗散。(3)轻量化与刚度匹配的协同优化:采用高强钢、复合材料或拓扑优化技术减轻结构自重,同时通过刚度分布优化避免刚度突变引发的应力集中。(4)模块化与可更换设计的创新应用:将关键构件(如节点、支撑)设计为可更换单元,通过标准化接口与快速连接技术实现震后快速修复。

4.3 材料选择与性能优化

材料性能优化是提升海洋钢结构抗震韧性的基础,针对海洋环境(如高盐雾、低温、冰激振动等),开发专用钢材(如耐候钢、低温韧性钢)或复合涂层钢材。通过激光焊接、机器人自动化焊接等先进工艺,结合热处理技术(如正火、淬火),降低焊接残余应力与裂纹敏感性。通过材料微观组织调控(如晶粒细化、相变诱导塑性)与表面强化技术(如喷丸、渗氮),延长结构疲劳寿命。结合高应变率试验与低温试验数据,修正材料非线性本构关系(如Ramberg-Osgood模型),提高数值模拟精度。

4.4 考虑海洋环境的基础设计优化

海洋环境(如海流、波浪、软土、冰激振动等)对基础抗震性能影响显著,需针对性优化基础设计:通过三维有限元分析(如ABAQUS)考虑桩-土非线性接触、液化效应与软土蠕变,评估基础刚度与阻尼对结构动力响应的影响。结合数值模拟与模型试验,调整系泊缆预张力、刚度与布置方式,减小地震作用下的平台漂移与扭转。通过增加基础宽度、设置抗滑键或采用配重块,提升基础在地震波与海流联合作用下的稳定性。例如,在跨海桥梁重力式基础中,需考虑波浪爬升与冲刷对基础抗滑稳定性的影响。针对极地海域的冰激振动,采用抗冰基础(如锥形桩、破冰裙板)或冰区附加阻尼装置。例如,在北极海域导管架平台中,可设置冰区振动吸收器(IVA)降低冰激荷载。

4.5 建立海洋钢结构抗震设计数据库

数据库建设是推动抗震设计标准化的关键,需整合多源数据实现协同优化与智能化设计:收集全球海洋地

震记录(如海底强震仪数据、近海地震台网数据),构建适用于不同海域的地震动参数数据库(如PGA、卓越周期、反应谱)。例如,针对南海海域,需建立专属地震动数据库以支持区域性抗震设计。汇总振动台试验、数值模拟与原型监测数据,建立结构动力响应特征(如层间位移角、能量耗散、损伤指标)的统计模型。例如,在导管架平台中,需建立不同地震强度下的损伤演化数据库^[4]。整合钢材力学性能(如强度、韧性、疲劳寿命)、腐蚀速率与低温性能数据,支持材料选型与寿命预测。例如,针对极地海域,需建立低温-腐蚀耦合作用下的材料性能退化数据库。收录典型海洋钢结构(如导管架平台、FPSO、跨海桥梁)的抗震设计参数与优化方案,形成可复用的设计模板。例如,在FPSO设计中,需建立标准化模块库以支持快速设计。基于数据库与机器学习算法(如深度学习、强化学习),开发自动化抗震设计工具,实现参数化建模、多目标优化与风险评估。例如,通过BIM技术与数据库集成,实现海洋钢结构抗震设计的全流程数字化。

结束语

海洋钢结构的抗震性能与设计优化是保障海洋工程安全的核心课题。随着海洋开发向深海、极地等极端环境延伸,对抗震设计提出了更高要求。未来需进一步深化多学科交叉研究,融合大数据、人工智能等先进技术,构建更加精准的抗震设计理论与方法体系。同时加强工程实践与监测反馈,推动抗震设计从“被动防御”向“主动韧性”转变,为海洋经济可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]谭钰玲,李慧峰,都来盼,等.城市高层宜居建筑结构抗震性能分析[J].江苏建筑,2023,(06):56-59.
- [2]莫留朋,戴玉帅,魏凯扬,等.复杂高层钢结构抗震性能分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(03):4-6.
- [3]张立国.隔震支座在钢结构建筑中的应用分析[期刊文章].土木工程与管理学报,2020,33(1):34-40.
- [4]王华科.建筑钢结构工程设计及其注意事项[J].建筑技术开发,2020,47(14):11-12.