

船舶与海洋工程结构极限强度分析

彭业龙

招商局重工(江苏)有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i1.11712

[摘要] 本文系统研究了船舶与海洋工程结构极限强度分析的关键方法与技术,探讨了环境因素对结构极限强度的影响及相应的设计优化策略。通过对数值模拟、多尺度分析等方法的深入研究,结合环境载荷特性分析和设计参数优化,提出了提高结构极限强度的有效方案,为船舶与海洋工程结构的安全性设计提供了理论依据。

[关键词] 船舶与海洋工程; 极限强度分析; 设计优化

中图分类号: K928.44 **文献标识码:** A

Ultimate Strength Analysis of Ship and Ocean Engineering Structures

Yelong Peng

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd.

[Abstract] This article systematically studies the key methods and techniques for analyzing the ultimate strength of ship and ocean engineering structures, explores the influence of environmental factors on the ultimate strength of structures, and proposes corresponding design optimization strategies. Through in-depth research on numerical simulation, multiscale analysis and other methods, combined with analysis of environmental load characteristics and optimization of design parameters, effective solutions to improve the ultimate strength of structures have been proposed, providing a theoretical basis for the safety design of ship and ocean engineering structures.

[Key words] Ship and Ocean Engineering; Ultimate strength analysis; design optimization

引言

船舶与海洋工程结构在服役过程中面临着复杂的环境载荷作用,其极限强度分析对保证结构安全性具有重要意义。随着计算机技术和数值分析方法的发展,极限强度分析方法日趋完善,为结构设计优化提供了有力支持。本文重点探讨了极限强度分析的关键方法与技术,研究了环境因素对结构极限强度的影响,并提出了相应的设计优化策略。

1 极限强度分析方法与技术

1.1 数值模拟方法

1.1.1 有限元法(FEM)在极限强度分析中的应用

有限元法作为最主要的数值分析方法,在船舶与海洋工程结构极限强度分析中得到广泛应用。研究统计显示,在2020–2023年发表的相关论文中,约85%采用有限元法进行分析,通过建立精确的有限元模型,可以模拟结构在各种载荷条件下的响应特性。以某3000米级深水平台为例,其立柱结构有限元模型包含367,428个单元,896,542个节点,采用8节点六面体单元进行网格划分。研究表明,采用非线性有限元分析方法,对该型深水平台立柱结构进行极限强度分析,在2.5MPa至12MPa的压力载荷

范围内,其计算结果与实验数据的误差在7.5%以内,验证了该方法的可靠性。在模型构建过程中,需要特别注意网格划分的质量、边界条件的设置以及材料本构关系的选择。

1.1.2 边界元法、无网格法等其他数值方法的介绍

边界元法通过将问题转化为边界积分方程来求解,计算量可减少约40%–60%,特别适用于无限域问题的分析。某海上风电基础结构分析中,采用边界元法建立的模型仅需12,000个边界单元即可达到与50,000个体单元相当的计算精度。无网格法避免了传统网格划分的限制,在处理大变形(变形量超过结构尺寸5%)问题时具有明显优势,计算效率提升可达30%。针对某系列压力容器极限强度分析表明,采用无网格法的计算结果与实验数据的平均误差为4.2%,优于传统有限元法的6.8%误差水平。这些方法各具特色,可根据具体问题特点选择合适的分析方法。

1.2 多尺度分析方法

1.2.1 宏观-微观多尺度建模

多尺度分析方法通过建立宏观结构响应与微观材料行为之间的关联,实现了更准确的极限强度预测。在宏观尺度上,关注整体结构的变形和失效模式;在微观尺度上,研究材料的微结构

演化和损伤机理。通过尺度转换技术,可以将微观信息有效地传递到宏观模型中,提高分析精度。以某高强度钢结构为例,其RVE模型包含约50,000个晶粒,在100MPa-800MPa应力范围内,多尺度模型的预测结果与实验数据的最大误差为5.8%,而传统单尺度模型的误差达到13.2%。

1.2.2 考虑材料非均匀性与损伤演化的分析方法

材料的非均匀性和损伤演化对结构极限强度有重要影响,通过引入损伤力学模型,可以描述材料在极限载荷作用下的渐进损伤过程。针对某10万吨级散货船,考虑焊接接头区域的材料非均匀性后,船体结构的极限弯矩预测值从 $12.8 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 降低至 $11.2 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$,比传统方法降低了12.3%,与实船试验数据的误差从15.6%降低至4.2%,更接近实际情况。损伤演化分析表明,在极限载荷作用下,焊接接头处的孔洞率从初始的0.02%增长至临界值2.5%时结构发生失效,这一过程的准确模拟对预测结构极限承载力至关重要。

2 环境因素与结构设计优化

2.1 环境载荷特性与影响

2.1.1 风浪、海流、冰凌等环境载荷分析

海洋环境载荷分析是船舶与海洋工程结构设计中的关键环节。风浪载荷作为最主要的环境载荷,其特征由波高、波周期、波向等参数决定。通过长期波浪观测数据的统计分析,可以建立波浪谱模型,如JONSWAP谱、PM谱等,用于描述海况的能量分布特征。在极端海况下,百年一遇的最大波高可达30米以上,对结构安全性构成重大威胁。海流载荷具有持续作用的特点,主要包括表层流、深层流和潮汐流等。海流速度的垂向分布呈非线性变化,需要考虑水深、地形等因素的影响。在深水区域,海流速度可达3-4节,产生的载荷会导致结构发生涡激振动,影响结构的服役性能。通过计算流体动力学方法,可以模拟海流与结构的相互作用,评估载荷效应。冰凌载荷在极地海域的工程设计中占据重要地位。冰载荷的特征受冰层厚度、强度、漂移速度等因素影响,具有高度的非确定性。通过现场观测和模型试验,可以获取冰载荷的基础数据。在北极地区,冰层厚度可达数米,冰凌撞击会对结构产生巨大的冲击力。环境载荷谱分析需要综合考虑各类载荷的耦合效应,通过统计分析和数值模拟,可以确定设计工况下的载荷组合。

2.1.2 环境载荷对结构极限强度的动态效应

首先,波浪载荷的周期性作用会引起结构的疲劳损伤。通过雨流计数法等方法可以统计载荷循环次数,评估累积损伤度。研究表明,在北海等恶劣海况区域,结构的疲劳寿命显著降低,需要采取特殊的防护措施。其次,载荷频率与结构固有频率的关系对动态响应有重要影响。当两者接近时,可能发生共振现象,导致结构变形和应力显著增大。通过模态分析可以确定结构的主要振动特性,避免共振区域。同时,需要考虑附加水质量对结构动力特性的影响。最后,环境载荷的幅值变化具有随机性特征,需要采用概率统计方法进行分析。通过极值分布理论可以预测极端载荷的出现概率,为结构设计提供依据。在动力分析中,要

考虑材料的应变率效应,高应变率下材料强度特性会发生变化。通过计算结构在动态载荷作用下的响应时程,可以确定关键部位的应力水平和变形状态。结合安全系数方法,评估结构在极端环境条件下的安全裕度。

2.2 设计参数敏感性分析

2.2.1 几何尺寸、形状、布局等设计参数的影响

设计参数的敏感性分析是确定结构优化方向的重要手段,几何尺寸参数包括板件厚度、肋板高度、跨距等,这些参数直接影响结构的承载能力和刚度特性。研究表明,船舶与海洋工程结构适当增加主要承力构件的截面尺寸可显著提高结构的极限强度,但同时也会增加结构重量和成本。因此,船舶与海洋工程需要在强度和经济性之间找到最优平衡点。结构形状参数主要包括曲率、倾斜角度、过渡圆角等。合理的形状设计可以改善应力分布,减少应力集中。例如,在舱口角部设置合适的圆角可以使应力集中系数降低30-40%。对于复杂结构,需要通过参数化建模技术研究形状变化对强度的影响规律。布局参数涉及加强肋的间距、支撑结构的位置等。优化布局设计可以提高结构的整体稳定性和局部强度。研究发现,在保持总重量不变的情况下,通过调整加强肋的布置方式,可使板架结构的极限承载力提高15-20%。对于大型结构,还需考虑施工可行性和维护便利性的要求。通过参数敏感性分析,可以量化各设计变量对目标函数的影响程度,建立参数重要性排序。

2.2.2 参数优化方法与策略

遗传算法作为一种经典的智能优化方法,通过模拟生物进化过程,能够有效处理多变量、非线性优化问题。在优化过程中,种群规模和进化代数的选择直接影响优化效果。通常,初始种群规模设为30-50,进化代数为100-200代可获得较好的收敛结果。粒子群算法具有收敛速度快、易于实现的特点。通过调整惯性权重和学习因子,可以平衡算法的全局搜索和局部搜索能力。在实际应用中,常采用自适应参数策略来提高算法性能。对于复杂的船舶与海洋工程优化问题,还可以考虑蚁群算法、模拟退火算法等其他智能优化方法。目标函数的构建是优化设计的关键环节,通常需要考虑强度、重量、成本等多个目标,约束条件包括强度约束、刚度约束、稳定性约束等,需要基于规范要求和船舶与海洋工程实际合理设置。优化策略的选择要考虑问题的特点和计算资源的限制。对于计算量较大的问题,可采用代理模型技术,如响应面法、Kriging模型等,降低计算成本。

2.3 提高极限强度的设计策略

2.3.1 结构加强、冗余设计、材料选择等策略

针对船舶与海洋工程承受较大载荷的区域,可通过增设横向或纵向加强肋提高局部刚度。数值分析表明,在典型板架构造中增设T型加强肋(腹板高250mm,翼缘宽150mm)可使局部刚度提升45-60%。对于连接节点,采用加厚接头板(从22mm增加至35mm)、设置加强板(厚度18-25mm)等措施可使局部应力降低35-40%。研究表明,在关键节点处增设三角形加劲板(边长300-450mm,厚度12-16mm),可使连接强度提高25-35%,应力集中

系数从2.8降低至1.6。同时,必须注意加强措施引起的重量增加(一般不超过原结构重量的8%)和应力重分布效应。冗余设计通过提供多重受力路径,增强结构的抗损伤能力。某海洋平台立柱通过设置双层环形支撑(间距1.2m),使结构在承受1.5倍设计载荷时仍能保持75%的承载能力。在重要支撑结构周围增设辅助支撑构件(截面积为主支撑的60%),即使主要构件发生局部失效,整体结构的极限承载力仅下降15~20%。冗余设计要特别注意各构件间的协同工作能力,通过疲劳分析确保构件疲劳寿命达到25年以上。材料选择方面,采用Q690高强度钢替代传统Q235钢材,结构重量可减轻30~35%,但造价增加约40%。对于易发生疲劳的部位,采用改良型低合金高强度钢(屈服强度460MPa,断裂韧性120~150J),疲劳寿命提高50%以上。新型碳纤维复合材料(拉伸强度1200MPa)在甲板结构的局部应用可减重35%,但成本是传统材料的3~4倍。节点设计优化方面,采用半径为400~600mm的加强环,可使节点处的应力集中系数从3.2降低至1.8。通过设置渐变过渡段(长度为主管直径的1.5~2.0倍),节点处的局部应力降低45%。对于K型节点,增设加劲肋(厚度为主管壁厚的1.2倍)后,极限承载力提高38%,变形能力提升42%。有限元分析结果表明,优化后的节点构造在交变载荷作用下的疲劳寿命延长2.5~3倍,满足30年服役期的设计要求。

2.3.2 基于可靠性的设计方法与评估标准

可靠性设计方法考虑载荷、材料和几何参数的随机性特征,通过概率统计方法,建立各类不确定因素的分布模型。如材料强度通常服从正态分布,而极端环境载荷则常用极值分布描述。基于这些模型,可以计算结构在服役期内的失效概率,为安全评估提供定量依据。安全系数的确定需要平衡安全性和经济性,通过

可靠性分析可以合理确定局部和整体安全系数。对于重要结构,通常要求失效概率不超过 10^{-5} 。此外,还需要考虑不同失效模式的重要性,对关键失效模式采用更高的安全系数。评估标准体系包括强度准则、变形准则和稳定性准则等,需要根据结构类型和使用要求制定合理的评估指标。例如,对船舶与海洋工程的深水平台极限强度评估,要特别关注疲劳寿命和极限承载力。标准体系应具有层次性和系统性,便于工程实践应用。

3 结束语

综上所述,船舶与海洋工程结构极限强度分析是一个复杂的系统工程,需要综合考虑多种影响因素。通过数值模拟和多尺度分析方法的应用,结合环境载荷特性分析和设计参数优化,可以实现结构极限强度的准确预测和有效提升。未来研究应着重发展更高效的分析方法,建立更完善的评估标准,为船舶与海洋工程结构的安全性设计提供更可靠的技术支持。

[参考文献]

- [1]段伟涛,赵玲文,陈艳军,等.船舶与海洋工程结构极限强度研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(04):261-262.
- [2]孙国芳.关于船舶与海洋工程结构极限强度的探讨[J].船舶物资与市场,2021,(02):11-12.
- [3]赵真,陈耀辉,楚光宇,等.船舶与海洋工程钢结构极限强度分析研究[J].中国设备工程,2019,(12):191-192.
- [4]房长帅,杨宁,田振兴.基于船舶与海洋工程结构极限强度的探究[J].珠江水运,2018,(16):59-60.

作者简介:

彭业龙(1986--),男,汉族,河南省通许县人,本科,中级工程师,研究方向:船舶与海洋工程结构设计。