

船舶结构可靠性优化设计方法研究

Research on Reliability Optimization Design Methods for Ship Structures

陆冠宇

Guanyu Lu

招商局重工（江苏）有限公司 中国·江苏南通 226000

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226000, China

摘要：论文围绕船舶结构的可靠性优化设计方法进行了深入的理论与技术探讨。在可靠性基础理论部分，分析了船舶结构在复杂载荷作用下的受力情况，并建立相应的数值分析模型。进一步识别并研究了船舶结构失效的典型模式与机理，为后续的可靠性评估提供了理论基础。在此基础上，开展了可靠性数学模型的构建和评估方法的研究。在优化设计技术方面，提出并探讨了多目标优化设计方法，分析了结合材料性能与疲劳寿命选择的策略，研究了结构布局与重量分配的优化手段，最后深入探讨了控制船舶结构脆性与塑性破坏的关键策略。论文旨在提高船舶结构设计的全面性与实用性，进而提升船舶的结构可靠性，为船舶工程领域提供有益的参考。

Abstract: This paper conducts in-depth theoretical and technical discussions on the reliability optimization design method of ship structures. In the section of reliability basic theory, the stress situation of ship structures under complex loads was analyzed, and corresponding numerical analysis models were established. Further identification and study of typical modes and mechanisms of ship structural failure provided a theoretical basis for subsequent reliability assessment. On this basis, research was conducted on the construction and evaluation methods of reliability mathematical models. In terms of optimization design techniques, multi-objective optimization design methods were proposed and explored, strategies combining material properties and fatigue life selection were analyzed, optimization methods for structural layout and weight distribution were studied, and finally, key strategies for controlling brittle and plastic failure of ship structures were explored in depth. This paper aims to improve the comprehensiveness and practicality of ship structural design, thereby enhancing the structural reliability of ships and providing useful references for the field of ship engineering.

关键词：船舶结构；可靠性优化；多目标优化；材料选择

Keywords: ship structure; reliability optimization; multi objective optimization; material selection

DOI: 10.12346/etr.v6i3.9181

1 引言

随着全球海洋活动的增加，船舶结构的可靠性显得尤为重要。船舶在设计 and 制造过程中需要考虑到各种海上作业的严苛条件，如海浪冲击、风力作用以及温度变化等自然环境因素，这些都将对船舶结构的稳定性和耐久性提出高要求。因此，船舶结构设计不仅需要满足航行性能和使用需求，更需全面考量和评估可靠性。

2 船舶结构可靠性基础理论

2.1 船舶结构的受力分析与模型

船舶结构在设计过程中对可靠性的分析至关重要，因为它直接关系到船舶在面对复杂海洋环境时的安全性和稳定性。这一过程需精准模拟船体在实际运行中所承受的各种力学作用，包括水动力、风载荷、波浪冲击力和自身重量等。考虑到船舶在不同条件下，受力情况及其反应可能出现差

【作者简介】陆冠宇（1989-），男，中国江苏淮安人，本科，工程师，从事海洋风电安装平台、汽车滚装船、LNG运输船、结构设计研究。

异, 结构受力分析依赖于创建准确的计算模型, 这些模型通过对船体进行离散化处理, 如有限元方法, 将船体划分为若干微小单元, 每一个单元都可以通过物理方程来描述其在受力后的行为^[1]。这种方法的优势在于能够考虑到局部结构特征及其对整体性能的影响, 允许工程师评估特定设计在极端条件下的响应。

实施这种受力分析与模拟时, 还需要考虑到材料特性, 屈服极限和疲劳寿命预测等因素。不仅如此, 随着运营过程中维护和老化的影响, 船舶结构的可靠性会发生变化, 这要求模型具备预测与适应这些变化的能力。弹塑性分析、断裂力学和腐蚀影响等非线性问题, 也必须在模型中得到适当的表达。先进的受力分析模型结合了概率统计方法以考虑不确定性的存在, 从而提供更加全面和实际的可靠性评估。

2.2 船舶结构失效模式与机理

在船舶结构设计领域, 鉴定和分析失效模式及其机理是确保船舶可靠性的关键步骤。船体结构的失效模式多种多样, 通常包括疲劳裂纹、冲击损伤、材料腐蚀等, 这些模式往往因复杂的海洋环境而加剧。疲劳裂纹是由于反复的载荷作用于船体结构上, 造成材料逐渐损伤并最终导致裂纹产生。这类失效模式强调了局部结构细节, 如焊缝配置、应力集中点等处设计优化的重要性。冲击损伤则主要源自浮冰、漂浮物碰撞或由极端波浪引起的局部压力突变, 此种类型的失效侧重于整体结构的弹性以及吸能性设计。当涉及材料腐蚀时, 必须考虑到化学成分、电位差和海洋微生物等因素, 这些复杂作用可能导致钢铁等结构材料逐渐削弱, 并形成坑蚀或一般性腐蚀。

每一种失效模式都有着其独特的物理机理, 对策也必须针对具体情况来设定。深刻融入对失效机理的理解, 设计者可以通过精细化设计来提高结构组件的耐久性和安全裕度。例如, 在考虑疲劳裂纹扩展时, 可以采用断裂力学原理预测裂纹增长速率, 配合非破坏性检测技术实时监控结构健康状态, 并进行必要的强化处理。针对冲击损伤, 则可能需利用数字仿真工具来模拟碰撞事件, 评估不同设计方案对冲击能量的吸收与分散能力。至于材料腐蚀问题, 则需要选用抗腐蚀能力更佳的材料或涂层, 并制定有效的维保策略, 如牺牲阳极保护或规律性的表面处理。

2.3 可靠性数学模型与风险评估分析

在船舶结构可靠性优化设计的研究中, 建立精确的可靠性数学模型是评估船舶结构性能的首要步骤。这些模型必须能够充分反映出结构在实际运营环境下的复杂性与不确定性, 如受到随机波浪载荷、腐蚀和疲劳累积等因素的影响。通过引入随机过程理论、极值统计以及断裂力学原理, 数学模型能够用于预测结构在给定条件下的损伤概率和寿命期望^[1]。风险评估分析则进一步实现了对可能导致船舶结构失效的概率分布进行量化的过程。例如, 采用蒙特卡罗模拟等随机仿真技术, 来生成代表性的船舶使用场景及其对应的结

构性能评价。

可靠性数学模型与风险评估分析在为优化设计提供量化决策支持方面发挥着至关重要的作用。通过集成诸如有限元分析得出的结构应力状态、随机载荷模型与服役时间预测等多项关键参数, 设计人员可以有效地识别和权衡设计变量间的敏感性, 从而在保证安全性和经济性的基础上, 推动船舶结构向更高可靠性水平迈进。进一步地, 通过故障树分析 (FTA) 和事件树分析 (ETA) 等系统工程技术, 风险评估可以揭示潜在的弱点并指导改进措施, 使船舶结构设计在面临复杂多变海洋环境时, 抵达一个更为优化和可行的平衡点。

3 船舶结构可靠性优化设计技术

3.1 多目标优化设计方法

船舶结构的多目标优化设计方法涉及在满足特定约束条件的同时, 对多个经常相互冲突的目标 (如重量、成本、强度、稳定性等) 进行权衡和优化。这种方法通常需要先定义一个目标函数群, 并为每个目标赋予一个权重, 用以表示其在整体设计中的相对重要性。由此产生的最优化问题是一系列权衡取舍的结果, 它不能简单地求解出一个全局最优解, 而是得到一系列的 Pareto 最优解, 即不可能在一个目标上进行改进而不在其他目标上退步的解集合。在应用这些方法时, 找到适当的权重配比尤为关键, 这要求设计者具备综合考虑各个设计目标的能力和经历。

解决这类优化问题的技术手段多样, 包括基于梯度的优化算法和启发式算法等。例如, 遗传算法 (GA) 和粒子群优化 (PSO) 等启发式算法, 由于它们在处理非连续、非线性问题方面的高效性而被广泛采用。通过仿真自然界的进化过程, 这些算法能够在多个可能的解之间搜索, 以找到满足所有设计目标的最佳解。此外, 跨学科的协同也为多目标优化提供了新的解决途径; 由结构工程、材料科学、流体力学等领域的专家共同讨论并评估, 确保设计方案在各方面都达到预期的性能标准。这样, 通过精细调整算法参数并结合不同领域的深入知识, 多目标优化设计方法为实现高效率且可靠的船舶结构提供了理论与实践并重的可行路径。

3.2 材料选择与疲劳寿命

在船舶结构可靠性优化设计中, 材料选择直接影响整体设计的强度和疲劳寿命, 从而成为关键决策之一。对于在海洋环境中长期作业的船舶来说, 材料不仅要具备良好的机械性能, 满足承载要求, 还应具有优异的耐腐蚀性和疲劳抗力^[2]。因此, 一种材料的选用, 需要基于其拉伸强度、屈服极限、断裂韧性以及抗腐蚀能力等多方面的性能指标综合评估, 此外, 为了保证船舶运营经济性, 材料的可加工性和成本效益同样不能忽视。对材料进行选择时, 必须通过精确计算和实验测试确定其在真实海上环境下的疲劳行为, 包括在反复载荷下的疲劳生命和损伤累积过程。

针对疲劳寿命的预估,通常采用S-N曲线(应力-寿命曲线)作为分析的基本工具,它描述了材料在特定应力循环下能承受的循环次数。例如,极端气候和恶劣海况对船体产生的应力。若要精确评估疲劳寿命,初始裂痕大小、加载频率以及材料的微观结构都不应被忽视。此外,疲劳设计方法一如疲劳裂纹增长模型和累积损伤理论一与耐久性分析紧密相连,用以预测在变载荷作用下材料的疲劳寿命。运用这些方法,可以对材料和构件进行针对性的改进,比如通过增加材料冗余、改进焊接工艺或引入新型高性能的复合材料等方式,从而显著提升船舶结构的可靠性和延长其使用寿命。

3.3 结构布局与重量分配

在船舶结构的优化设计中,结构布局与重量分配是至关重要的因素,因为它们直接关系到船体的稳定性、抗倾覆性以及整个船舶系统的性能。良好的结构布局确保了重要组件和货物的合理分布,从而提高了船舶的航行效率和安全性。在设计开始阶段,对主体结构布局进行优化,旨在尽可能减少材料用量和重量,同时最大化结构强度和刚度。此过程涉及对桁架、舱壁板主要结构单元位置和尺寸的详细规划,需要考虑重力、浮力及其他外载荷对船体稳定造成的影响^[3]。这些参数的设定必须基于详尽的静动态分析,以确保即使在最不利的海况下船舶也能保持良好的性能。

重量分配则需要密切关注各个部件的布置,特别是那些具有较大质量的机械和货物,它们的位置将直接影响船舶的总重心位置。优化重量分配的一个关键点在于实现船舶重心的低位化,这有助于提高其稳定性和抗覆性能。随着计算力学和计算流体力学工具的发展,工程师能够通过仿真不同的结构布局方案,并对重量分布进行精确的计算和调整。这些技术的应用促进了传统船舶设计方法的革新,使得可以在早期设计阶段就识别出结构问题并进行必要调整。

3.4 脆性与塑性破坏控制策略

脆性与塑性破坏是船舶结构设计中亟须考虑控制的失效形式,两者的控制策略对于保障船舶的安全性和可靠性起着决定性作用。在脆性破坏控制上,关键在于提升材料的断裂韧性及其抗冲击能力,从而避免在低温或高应力集中条件下出现突然且迅速的裂纹扩展。这就要求在材料选择和处理工艺上做出精心规划,例如选用较高韧性的合金材料,并通过

热处理等方式改善其微观结构^[4]。同时,增加结构冗余和引入损伤容限设计理念也有助于缓解这一问题,如适当增加板材厚度、设置止裂孔等都是常见的做法。另外,对于结构细节的设计也同样重要,比如优化焊缝配置和避免锐角几何设计,可以显著提高结构整体的抗脆断性能。

对于塑性破坏,强调的是确保结构在达到屈服点后仍具有足够的变形能力来吸收能量而不至于失效。因此,该控制策略需注重细化塑性变形区,防止因局部塑性变形导致的整体结构崩溃。其中,通过施加适宜的预应力、采用多道次成形工艺改善金属的晶粒细化,及选用延性更好的材料都是有效手段。实施上述措施,旨在使结构能够在超载情形下呈现出“延性的破坏”而非突发性彻底失效,从而为紧急响应与抢修赢得宝贵时间。此外,定期执行精确的应力分析和疲劳检测,以监视潜在的塑性变形累积,同样是确保结构长久安全运营的必要环节。

4 结语

综上所述,船舶结构可靠性优化设计方法的研究对于提高船舶安全性、扩展航海能力和降低经济成本有着不可估量的意义。通过对结构受力分析、失效模式探究和可靠性评估的基础理论研究,结合实际设计中的多目标优化、材料适应性、结构布局合理性以及破坏控制策略,本研究形成了一套系统的船舶结构可靠性优化设计框架。未来的研究应当继续在这一框架基础上进行深化与创新,特别是结合先进的设计理念、新型材料以及现代化的信息技术,不断优化设计方案,以期达到更高标准的船舶结构可靠性水平,增强船舶与海洋环境之间的安全和谐共生。

参考文献

- [1] 张捷.船舶结构可靠性优化设计方法研究[J].船舶物资与市场,2023,31(8):56-58.
- [2] 龙周,陈松坤,王德禹.基于SMOTE算法的船舶结构可靠性优化设计[J].上海交通大学学报,2019,53(1):26-34.
- [3] 李勇.船舶结构时变可靠性分析的一种非线性腐蚀模型[J].电子测试,2018(10):46-47+35.
- [4] 代伟业.船舶在冲击载荷作用下的可靠性结构设计[J].舰船科学技术,2017,39(18):1-3.