

船体结构优化设计与强度分析研究

聂广宁

上海中远海运重工有限公司, 上海 201913

DOI:10.61369/ERA.2025110017

摘 要 : 船体结构优化设计与强度分析是提高船舶安全性与经济性的重要途径。通过建立合理的结构模型, 结合有限元方法对关键部位进行应力分布和强度评估, 能够有效识别潜在薄弱环节。在优化设计过程中, 采用轻量化与高强度材料, 提高结构利用率并降低能耗。研究结果显示, 合理的优化设计不仅提升整体强度与稳定性, 还显著改善船体服役性能与使用寿命, 为现代船舶工程提供了科学支撑。

关 键 词 : 船体结构; 优化设计; 强度分析; 有限元方法; 安全性

Research on Optimized Design and Strength Analysis of Hull Structure

Nie Guangning

COSCO Shipping Heavy Industry (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201913

Abstract : Optimized design and strength analysis of hull structures are crucial for enhancing the safety and economic efficiency of ships. By establishing rational structural models and employing finite element methods to evaluate stress distribution and strength in key areas, potential weak points can be effectively identified. During the optimization process, the use of lightweight and high-strength materials enhances structural utilization and reduces energy consumption. The research findings indicate that reasonable optimized designs not only improve overall strength and stability but also significantly enhance the service performance and lifespan of the hull, providing scientific support for modern ship engineering.

Keywords : hull structure; optimized design; strength analysis; finite element method; safety

引言

船舶作为现代海上运输与资源开发的重要载体, 其结构设计直接关系到安全性、经济性和使用寿命。随着航运需求增长和海洋环境复杂化, 传统船体结构在强度与效率方面面临新的挑战。优化设计与强度分析不仅有助于提升船体承载能力和抗疲劳性能, 还能在降低能耗和材料成本的同时实现轻量化目标。探索科学的设计方法与先进的分析手段, 已成为船舶工程发展的关键方向。

一、船体结构优化设计的理论基础与方法

船体结构优化设计的理论基础主要建立在船舶力学、结构力学和材料科学等多学科的交叉融合之上。船体在海洋环境中长期承受波浪、风力、货载及自身重量的综合作用, 其结构设计不仅要满足强度、刚度和稳定性等基本要求, 还需兼顾经济性与实用性^[1]。传统船体结构设计多以经验公式和安全裕度为依据, 虽然能够保证一定的安全性, 但往往存在材料利用率低、结构重量过大等问题。随着计算力学和有限元分析方法的发展, 研究者逐渐将优化理论应用于船体设计中, 通过建立数学模型和目标函数, 对船体结构进行系统化改进。这一转变使得设计者能够在满足安全性的前提下, 最大限度地提高材料利用率和结构效率, 从而实现轻量化、节能化与高效化的综合目标。

在具体方法上, 船体结构优化设计通常包括结构建模、约束

条件设定、目标函数选择与优化算法应用等步骤。首先需要建立船体的合理模型, 该模型不仅要反映船体的整体几何特征, 还要细化到关键受力部位, 以确保分析结果的准确性。随后, 设计者会根据实际需求设定约束条件, 如结构强度不低于规范要求、结构变形不得超过安全极限、船体重量需控制在合理区间等。在此基础上, 通过构建目标函数来引导优化方向, 常见的目标函数包括最小化结构重量、最大化强度利用率、降低建造成本或提升整体稳定性等。优化过程中, 通常借助有限元分析技术对船体在不同工况下的应力分布和应变情况进行仿真, 从而识别潜在薄弱环节^[2]。与此同时, 各类智能优化算法如遗传算法、粒子群优化以及多目标优化方法的引入, 使船体结构优化设计具备更强的适应性和精细化特征, 有效提高了设计效率与可靠性。

随着海洋运输规模不断扩大以及绿色航运理念的提出, 船体结构优化设计的方法体系也在不断演进。近年来, 轻量化材料的

应用为优化设计提供了新的方向,诸如高强度钢、复合材料和铝合金等的使用,使船体在保证强度的前提下实现重量大幅降低,进而提高燃油效率与航速。此外,数字化与智能化技术的广泛应用,使得设计过程从单一的静态计算走向动态与全生命周期优化。通过大数据分析 with 多学科协同仿真,可以在设计初期预测船体在不同环境下的服役表现,为设计方案的优劣提供科学依据。绿色设计理念逐渐成为优化方法的重要组成部分,强调在满足结构强度与安全的同时,实现节能降耗与环境友好。这些新兴方法为未来船体结构的优化设计提供了广阔的应用前景与学术价值。

二、强度分析的关键技术与应用实践

强度分析作为船体结构设计中的核心环节,其主要目标是确保结构在复杂海洋环境下能够长期稳定运行而不发生失效。船体在服役过程中会受到波浪冲击、货物载荷、船体自重、风力以及偶发碰撞等多重作用,这些复杂工况对船体强度提出了极高要求。传统的强度分析方法主要依赖船体整体平衡计算与局部经验公式,但难以全面反映实际工况下的应力状态。随着计算力学的发展,有限元方法逐渐成为船体强度分析的主要工具,它能够将复杂船体划分为有限数量的单元,通过数值模拟计算出不同工况下的应力、应变与位移分布,从而识别薄弱部位并为设计改进提供数据支撑。在此基础上,研究者提出了线性与非线性有限元分析方法,前者多用于常规静态强度分析,而后者则能更真实地反映大变形、塑性失效以及疲劳损伤等复杂问题,使船体结构强度的计算结果更加可靠^[3]。

在关键技术方面,船体强度分析逐渐引入多种先进手段以提高准确性和适用性。首先是疲劳强度分析,它通过分析船体在周期性波浪载荷下的应力历程,预测关键结构部位的疲劳寿命,从而避免因累积损伤导致的突发性断裂。其次是屈曲分析,针对薄板与长细比结构,研究其在压缩或弯曲作用下的临界失稳条件,确保在高压和复杂环境下不发生屈曲破坏。此外,动态响应分析也是近年来的重要发展方向,它通过时域与频域方法研究船体在风浪载荷、冰载荷和碰撞冲击下的瞬态响应,为抗冲击与安全评估提供了科学依据^[4]。与此同时,断裂力学方法也逐步应用于船体强度评估,利用裂纹扩展模型和断裂韧性理论预测局部损伤的演化过程,从而为维修和寿命管理提供依据。这些关键技术的不断完善,使得船体强度分析从单一静态计算逐渐发展为全面、多维度的系统化研究,能够更好地指导设计和服役管理。

在应用实践中,强度分析已广泛应用于船体设计、建造和服役全生命周期管理。设计阶段,通过有限元模拟与试验验证相结合的方式,可以在早期识别潜在风险并进行针对性优化,显著减少后期修改与维修成本。在建造阶段,强度分析结果可为焊接工艺、材料选择和构件安装提供参考,确保施工质量满足强度要求。在服役阶段,借助结构健康监测系统实时采集应力和变形数据,再结合疲劳寿命预测模型,能够实现对船体运行状态的动态评估与预警,大幅提高安全性和可靠性。同时,强度分析在特殊船舶中的应用价值更加突出,例如液化天然气运输船、极地破冰

船和海洋工程平台等,由于其服役环境更加严苛,强度分析需要综合考虑低温脆性、冲击载荷与长时间疲劳累积等多种因素。在实践案例中,基于强度分析优化的设计方案不仅显著提升了船体抗波浪冲击和抗疲劳能力,还有效降低了材料冗余和能耗,实现了安全与经济的双重目标^[5]。可以说,强度分析技术的持续发展与实践应用,为现代船舶工程提供了坚实保障,也为未来高性能、绿色化船体结构设计奠定了重要基础。

三、优化设计在船体安全性与经济性提升中的作用

船体结构优化设计的核心目标之一是提升整体安全性。船舶在复杂多变的海洋环境中长期运行,不仅要承受持续的波浪载荷和风力作用,还要应对偶发的碰撞冲击和极端气候带来的风险。通过优化设计,可以有效改善船体受力分布,使关键结构部位的强度与刚度更加合理,避免因局部应力集中而导致的裂纹或疲劳损伤。例如,通过优化舱壁和纵横骨架的布置,可以降低甲板和底板的应力峰值,提高抗弯曲和抗扭转能力。同时,采用有限元分析与优化算法的结合,可以在设计阶段准确预测潜在失效模式,从而及时调整结构参数,实现对整体安全性能的前置性控制。实践证明,优化后的船体不仅在常规运行条件下具有更高的安全裕度,在突发情况下也具备更强的抗风险能力,为船舶的长期服役提供可靠保障。

在提升经济性方面,船体结构优化设计同样发挥着至关重要的作用。船体重量是影响燃油消耗与运营成本的关键因素之一,过度保守的设计往往导致材料冗余,增加建造成本和航行能耗^[6]。通过优化设计,可以在保证强度和稳定性的前提下,减少不必要的结构重量,实现轻量化目标。高强度钢、铝合金和复合材料的合理使用,使得船体在满足安全需求的同时显著降低了重量,从而提高燃油效率和运输能力。此外,优化设计还可在建造阶段提升经济效益。通过合理规划构件尺寸与连接方式,可以降低焊接与装配的复杂度,减少施工误差和返工成本。对于船东而言,优化设计不仅意味着降低建造和运营费用,更意味着在激烈的航运市场竞争中获得更强的成本优势与经济回报。

船体优化设计对安全性与经济性的提升具有协同作用,而非单一取舍。过去,安全性与经济性常常被视为对立目标,过度追求安全会增加重量和成本,而过度追求经济性又可能削弱结构强度。但随着优化方法与计算技术的进步,二者之间的矛盾逐渐得到缓解。现代多目标优化设计能够在不同指标之间实现平衡,既保障船舶在极端环境下的安全运行,又在全生命周期内降低能耗与维护成本。例如,利用多学科优化方法,可以同时考虑强度、稳定性、疲劳寿命和燃油效率等因素,从整体上提升船舶性能。更进一步,随着绿色航运和智能制造的推进,优化设计还将扩展到环保与可持续性领域,使船体在降低碳排放和提高资源利用效率方面发挥更大作用。这种基于系统性思维的优化路径,使得船体结构设计真正实现了安全性与经济性的双重提升,为未来船舶工程发展指明了方向。

四、船体结构优化与强度分析的发展趋势

船体结构优化与强度分析的发展趋势首先体现在数字化与智能化技术的深入应用。随着计算机技术和工程软件的不断进步，船体设计已经逐渐摆脱单纯依赖经验和简化计算的阶段，进入基于高精度数值模拟与智能优化的新阶段。三维建模、有限元分析和多学科协同仿真技术的成熟，使设计者能够在虚拟环境中对船体进行全方位性能评估，从而大大缩短设计周期，提高方案的可靠性。同时，大数据和人工智能的引入，为船体优化提供了新的方法。例如，基于机器学习的预测模型能够快速筛选出潜在的设计缺陷，遗传算法、粒子群优化等智能算法可以在多目标优化问题中找到更加合理的结构参数组合^[7]。未来，随着数字孪生技术的发展，船舶在设计、建造和服役过程中都可以通过虚拟模型与真实船体的互动，实现全生命周期的动态优化与强度监控，这将极大提升船舶工程的智能化水平。

绿色化与可持续发展成为船体结构优化与强度分析的重要趋势。在全球能源紧张和环保法规日益严格的背景下，航运业正面临节能减排与降低碳排放的双重压力。优化设计不仅要考虑传统的强度与安全性，还要兼顾环境影响和资源利用效率。轻量化设计理念在未来将更加突出，高强度钢、铝合金、复合材料的广泛应用能够在保证强度的前提下降低船体重量，从而减少燃油消耗与运营成本。此外，基于优化设计的绿色航运方案将更加关注结构的长寿命与低维护特性，延长船舶的服役周期，减少因维修或更换而带来的额外资源消耗。与此同时，强度分析方法也会结合环保要求进行改进，例如在疲劳寿命预测和断裂力学分析中加入

全寿命周期的能耗与排放评估指标，使结构设计与绿色目标紧密结合，为航运业实现可持续发展提供有力支撑。

跨学科融合与智能监测技术的结合将推动船体优化与强度分析向更加系统化和前瞻化的方向发展。未来的船体设计不再仅仅依赖单一学科，而是需要船舶工程、材料科学、流体力学、信息技术等多领域的协同创新。通过多学科优化设计方法，可以在强度、稳定性、经济性、能效和环境影响等多重目标之间实现平衡^[8]。随着传感器与物联网技术的普及，船舶在服役阶段能够实现实时监测与数据回传，为强度分析提供动态数据支持。这些数据不仅能够用于验证设计的合理性，还能通过智能算法进行预测性维护和风险预警，大幅提升船体结构的安全性和可靠性。未来，随着自动化航运和无人船的发展，优化设计与强度分析还将更多关注极端海况和特殊任务需求，以确保船体在复杂环境下的自适应能力。可以预见，数字化、绿色化与智能化将成为推动船体结构优化与强度分析持续进步的核心动力，为船舶工程的未来发展奠定坚实基础。

五、结束语

船体结构优化设计与强度分析是现代船舶工程发展的核心内容。通过理论基础与方法的完善，结合先进的强度分析技术，能够有效提升船体的安全性与可靠性。在优化设计的推动下，船体不仅实现轻量化和经济性提升，还满足绿色环保和可持续发展的需求。未来，数字化、智能化和多学科融合将成为主要发展方向，为船舶结构的科学设计和高效运行提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 叶超锦, 陈先锡. 船体结构强度分析与优化设计 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(09): 24–26. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.09.008.
[2] 李茂胜. 船体结构设计及优化措施分析 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(03): 1–3. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.03.001.
[3] 王玲玲, 沈大亮. 船体结构生产设计要点探究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(12): 49–51. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.12.015.
[4] 毕斌, 刘忠伟. 船体结构形式要点与优化设计研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(09): 36–38. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.09.012.
[5] 盛婷, 李晓文, 朱兆一, 等. 船体结构优化技术研究进展 [J]. 船舶工程, 2024, 46(07): 26–35. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.07.04.
[6] 郝钟昊. 船体结构集成优化设计研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(01): 20–22. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.01.006.
[7] 熊永亮, 张磊. 船体结构形式要点分析及优化设计 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(06): 27–29. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.06.009.
[8] 丁健亮, 康煜哈, 张亮, 等. 船体结构极限强度优化设计 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47(04): 639–643.