

船舶结构安全评估与优化设计研究

孙志杰

中国船级社实业有限公司宁波分公司, 中国·浙江 宁波 315000

摘要: 论文探讨了船舶结构安全评估与优化设计的重要性及方法。通过对船舶结构强度的分析, 采用有限元模拟、载荷试验等手段评估结构安全性。优化设计则通过材料选择、结构形式改进、算法优化等提升船舶性能。研究旨在提高船舶安全性、经济性和环保性, 推动船舶工业可持续发展。

关键词: 船舶结构安全评估; 优化设计; 有限元分析; 材料选择; 算法优化

Research on Safety Assessment and Optimization Design of Ship Structures

Zhijie Sun

China Classification Society Industrial Co., Ltd. Ningbo Branch, Ningbo, Zhejiang, 315000, China

Abstract: This paper explores the importance and methods of ship structural safety assessment and optimization design. By analyzing the structural strength of the ship, the safety of the structure is evaluated using finite element simulation, load testing, and other methods. Optimization design enhances ship performance through material selection, structural form improvement, algorithm optimization, and other means. The research aims to improve the safety, economy, and environmental friendliness of ships, and promote the sustainable development of the shipbuilding industry.

Keywords: ship structural safety assessment; optimize design; finite element analysis; material selection; algorithm optimization

0 前言

随着全球航运业的蓬勃发展, 船舶作为重要的水上交通工具, 其结构的安全性与优化设计越来越受到重视。船舶结构安全评估是确保船舶在复杂海洋环境中稳定航行的基础, 而优化设计则旨在提高船舶的性能、降低运营成本并满足日益严格的环保要求。因此, 深入研究船舶结构安全评估与优化设计具有重要的现实意义。

1 船舶结构安全评估

1.1 船舶结构强度分析

船舶结构强度是指船体承受各种外部载荷(如波浪、风力、冰、碰撞等)的抵抗能力, 是保证航行安全的重要指标之一。强度分析是船舶结构安全评估的核心内容, 主要包括载荷分析、应力分析和位移分析。

载荷分析是对船体所受载荷进行分析, 以确定船体所受载荷的大小、方向和作用位置等参数。在进行载荷分析时, 需要考虑船体遇到不同环境(如浅水、深水、大风浪等)时所受的不同载荷, 以及船舶在不同航行状态下的受载情况等因素。例如, 在浅水区航行时, 船体可能受到底部搁浅等载荷作用; 而在大风浪中航行时, 船体则需承受巨大的波浪载荷和风载荷。

应力分析是指对船体受载荷后的各个部位进行应力计算, 以评估船体所受应力的分布和稳定性。在进行应力分析时, 需要考虑船体的材料、结构形式以及所受载荷大小等因

素。通过有限元分析等数值模拟方法, 可以精确计算船体结构在不同工况下的应力分布, 包括弯曲应力、扭转应力、局部应力等, 从而评估结构的承载能力是否满足要求。

位移分析是指对船体在受载荷后的变形情况进行计算, 以评估船体的可靠性和稳定性。在进行位移分析时, 需要考虑船体的结构形式、所受载荷、载重状态以及海况等因素。同时, 位移分析还需考虑船体各部位的应变、应力和位移等参数之间的相互作用。通过位移分析, 可以预测船体在复杂载荷条件下的变形情况, 为结构优化设计提供依据^[1]。

1.2 船舶结构疲劳以及振动分析

船舶在长期运行中会经受反复载荷作用, 疲劳破坏是常见的失效形式之一。因此, 对船舶结构进行疲劳分析至关重要。疲劳分析需要考虑载荷的循环特性、应力幅值、平均应力等因素, 建立疲劳寿命预测模型。通过疲劳分析可以确定结构的疲劳薄弱部位, 并采取相应的措施来提高结构的疲劳寿命, 如优化结构设计、选择合适的材料、进行表面处理等。

船舶的振动会影响船员的工作舒适性和设备的正常运行, 同时也可能对结构本身造成疲劳损伤。因此, 对船舶结构进行振动分析是必要的。振动分析主要包括模态分析和振动响应分析。模态分析是研究结构振动模态的一种方法, 通过模态分析可以确定结构的固有频率、振型等模态参数。振动响应分析则是在已知结构模态和外部激励的情况下, 计算结构在振动载荷作用下的响应, 如位移、速度、加速度等^[2]。

2 船舶结构优化设计

2.1 材料选择与性能优化

材料的选择是船舶结构优化设计中的核心环节之一,直接关系到船舶的安全性、经济性和环保性。随着材料科学的不断进步,高强度钢、铝合金、复合材料等新型材料在船舶制造中的应用日益广泛,为船舶结构的轻量化、高强度和耐腐蚀提供了可能。

高强度钢以其优异的力学性能和相对较低的成本,成为船舶结构中的主流材料。通过优化钢材的合金成分和热处理工艺,可以显著提高钢材的屈服强度、抗拉强度和韧性,从而在保证结构安全的前提下,减少钢材的使用量,实现船舶的轻量化。此外,高强度钢还具有良好的焊接性和加工性,便于船舶的制造和维修。

铝合金材料则以其低密度、高强度和良好的耐腐蚀性,在高速船、游艇等小型船舶中得到了广泛应用。铝合金船舶不仅重量轻,而且航速快、燃油效率高,符合现代船舶对环保和节能的要求。然而,铝合金的焊接和加工难度较大,需要采用特殊的工艺和设备,这在一定程度上限制了其在大型船舶中的应用。

复合材料,如碳纤维增强塑料(CFRP)和玻璃纤维增强塑料(GFRP),以其极高的比强度和比模量,成为船舶结构轻量化的理想材料。复合材料船舶不仅重量轻、强度高,而且具有良好的耐腐蚀性和隐身性能,特别适用于军事舰艇和高端游艇。然而,复合材料的成本较高,且制造工艺复杂,需要高精度的模具和专业的技术人员,这在一定程度上制约了其大规模应用。

在材料选择的过程中,除了考虑材料的力学性能外,还需要综合考虑材料的成本、加工性能、耐腐蚀性、可回收性等因素。通过建立材料性能预测模型,可以评估不同材料在船舶结构中的适用性,为优化设计提供有力支持。同时,随着环保意识的提高,材料的环保性也成为越来越重要的考量因素。选择可回收、可降解的材料,可以减少船舶报废后对环境的影响,实现船舶工业的可持续发展^[3]。

2.2 结构形式设计与改进

结构形式的设计是船舶结构优化设计中的另一个关键环节。合理的结构形式不仅可以提高船舶的抗风、抗浪和抗震能力,还可以降低船体的振动和噪声,提高船员的舒适性和设备的安全性。

在船体线条设计方面,通过优化船体的形状和尺寸,可以降低航行阻力,提高航速。例如,采用流线型船体设计可以减少水流对船体的摩擦阻力;通过调整船体的长宽比和吃水深度,可以优化船体的兴波阻力。此外,合理的船体线条设计还可以提高船舶的稳性和抗沉性,确保船舶在恶劣海况下的安全航行。

在舱室结构设计方面,通过合理布置舱室和设备,可以提高船舶的货运能力和利用率。例如,采用双层底结构可

以增加船舶的货舱容积;通过优化舱室的布局 and 分隔,可以提高货物的装卸效率和船舶的灵活性。同时,合理的舱室结构设计还可以提高船员的居住舒适性和工作安全性,为船员提供良好的工作和生活环境。

在骨架结构设计方面,通过采用先进的骨架结构形式,如纵骨架式、横骨架式或混合骨架式,可以提高船体的强度和刚度。纵骨架式结构具有较大的纵向强度,适用于大型船舶;横骨架式结构则具有较大的横向强度,适用于小型船舶或局部加强区域。混合骨架式结构则结合了纵骨架式和横骨架式的优点,适用于各种类型的船舶。还可以采用一些特殊的结构形式来提高船舶的性能。例如,采用气泡减阻技术可以在船体底部形成一层气泡膜,减少水流对船体的摩擦阻力;采用艏龙骨、减摇鳍等减摇装置可以降低船舶在风浪中的横摇幅度,提高航行的稳定性。

2.3 优化算法与应用

随着计算机技术的不断发展,优化算法在船舶结构优化设计中的应用越来越广泛。优化算法可以通过迭代计算来寻找最优的结构尺寸、形状和布局方案,在保证结构性能的前提下实现重量的最小化。

常见的优化算法包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。遗传算法是一种基于生物进化原理的优化算法,通过模拟自然选择和遗传机制来搜索最优解。粒子群优化算法则是一种基于群体智能的优化算法,通过模拟鸟群或鱼群的觅食行为来寻找最优解。模拟退火算法则是一种基于物理退火过程的优化算法,通过模拟金属退火过程中的原子排列变化来寻找最优解。

在船舶结构优化设计中,可以根据具体的优化目标和约束条件选择合适的优化算法。例如,对于以重量最小化为目标的优化设计问题,可以选择遗传算法或粒子群优化算法;对于以结构强度最大化为目标的优化设计问题,可以选择模拟退火算法或基于梯度的优化算法。同时,为了提高优化算法的效率和准确性,还可以采用一些改进策略。例如,可以结合多种优化算法形成混合优化算法,以充分利用不同算法的优点;可以采用并行计算技术来加速优化算法的迭代过程;可以引入代理模型来减少优化算法对数值模拟的依赖,提高优化效率^[4]。

3 船舶结构安全评估与优化设计的实践应用

3.1 船舶建造过程中的安全评估与优化设计

在船舶建造过程中,安全评估与优化设计是确保船舶质量、提升船舶性能的关键环节。从船舶设计的初始阶段开始,就需要对船舶结构进行全面的安全评估,识别潜在的安全隐患,并通过优化设计手段加以解决。

在设计阶段,安全评估主要关注船舶结构的强度、稳定性、疲劳寿命等方面。通过有限元分析、数值模拟等手段,对船舶结构在不同工况下的应力、应变分布进行预测,评

估结构的承载能力是否满足设计要求。同时,结合船舶的航行性能、货运需求等因素,对船舶的线条设计、舱室布局、骨架结构等进行优化设计,以提高船舶的整体性能。例如,在设计大型油轮时,需要特别关注船体的抗沉性和防泄漏能力。通过优化船体结构、增加双层底设计、提高舱室密封性等措施,可以有效提升油轮的安全性能。此外,针对油轮在航行过程中可能遇到的恶劣海况,还可以通过优化船体线条、增加减摇装置等手段,提高油轮的航行稳定性。

在船舶建造过程中,需要实时监控船舶结构的建造质量,确保各项设计指标得到有效落实。通过无损检测、焊接质量监控等手段,对船体结构的焊接质量、材料性能等进行检测,及时发现并处理潜在的质量问题。同时,根据建造过程中的实际情况,对船舶结构进行必要的调整和优化,以确保船舶的安全性和性能满足设计要求。例如,在船体焊接过程中,如果发现焊缝存在缺陷或强度不足的情况,需要及时返修或加固处理。此外,如果建造过程中发现原设计方案存在不合理之处,如舱室布局不合理、骨架结构强度不足等,也需要及时进行调整和优化。

3.2 船舶运营过程中的安全监测与维护

船舶运营过程中的安全监测与维护是确保船舶安全航行的重要保障。通过安装传感器和监测系统等设备,可以实时监测船舶结构的应力、应变、振动等参数,及时发现潜在的安全隐患,并采取相应的维护措施进行处理。

安全监测系统是现代船舶运营中不可或缺的一部分。通过安装应力传感器、应变计、加速度计等设备,可以实时监测船舶结构在不同工况下的应力、应变和振动情况。同时,结合船舶的航行数据、气象数据等信息,对船舶的安全状态进行综合评估。例如,当船舶在航行过程中遇到恶劣海况时,安全监测系统可以实时监测船体的应力变化,当应力超过安全阈值时及时发出警报,提醒船员采取必要的措施进行处理。此外,安全监测系统还可以对船舶的疲劳寿命进行预测,为船舶的维修和保养提供科学依据。

根据安全监测系统的监测结果,可以制定针对性的维护策略,对船舶结构进行定期的检查、维修和保养。例如,对于发现存在应力集中或疲劳损伤的部位,需要及时加固处理或更换受损部件;对于船体的腐蚀部位,需要进行防腐处理以延长船舶的使用寿命。同时,还需要建立完善的维护档案,记录船舶的维护历史、维修记录等信息,为后续的维护和管理提供便利。此外,随着船舶运营时间的增长,还需要对船舶结构进行全面的评估和检测,以确定是否需要大规模的维修或改造。

3.3 船舶报废与回收过程中的环保处理

船舶报废与回收是船舶生命周期的最后一个环节,也是确保船舶工业可持续发展的重要环节。在船舶报废与回收过程中,需要采取环保型的处理措施,减少对环境的影响。

传统的船舶拆解方式往往会对环境造成严重的污染。

为了降低拆解过程中的环境污染,需要采用环保型的拆解技术。例如,采用无害化处理技术对拆解过程中产生的废弃物进行分类处理,确保有害物质得到妥善处理;采用先进的切割和分离技术,提高拆解效率并减少废弃物的产生。同时,还需要加强对拆解过程的监管和管理,确保拆解活动符合环保法规的要求。例如,建立拆解企业的准入制度,对拆解企业的环保设施、技术水平等进行严格审核;加强对拆解现场的监督检查,确保拆解活动按照规定的程序和要求进行。

船舶报废后,其材料仍然具有一定的回收价值。通过回收和再利用船舶材料,不仅可以减少资源的浪费,还可以降低船舶工业对环境的压力。例如,钢材、铝材等金属材料可以通过熔炼、再加工等方式进行回收;复合材料则可以通过破碎、分离等技术进行回收再利用。为了促进船舶材料的回收与再利用,需要建立完善的回收体系和再利用机制。例如,建立船舶材料回收网络,方便拆解企业将废弃材料进行分类回收;加强对回收材料的检测和评估,确保回收材料的质量符合再利用的要求;推动船舶材料与下游产业的对接,促进回收材料的再利用。船舶结构安全评估与优化设计的实践应用贯穿于船舶的整个生命周期。从建造过程中的安全评估与优化设计到运营过程中的安全监测与维护,再到报废与回收过程中的环保处理,每一个环节都需要我们认真对待并采取相应的措施来确保船舶的安全性和环保性。只有这样,才能推动船舶工业的可持续发展并为社会创造更大的价值^[5]。

4 结语

船舶结构安全评估与优化设计是船舶工业发展的重要领域。通过深入研究和实践应用,可以提高船舶的安全性、经济性和环保性,推动船舶工业的可持续发展。未来,随着科技的不断进步和船舶工业的发展需求,船舶结构安全评估与优化设计将面临更多的挑战和机遇。我们需要不断创新和优化设计方法,加强跨学科、跨领域的合作与交流,为船舶工业的发展贡献更多的智慧和力量。

参考文献:

- [1] 祝博,邱宇,张博文,等.基于智能方法的结构性能评估与优化设计技术[J].人工智能,2023(1):88-100.
- [2] 杨家豪.客滚车车辆舱通风系统仿真分析与优化设计[D].江苏:江苏科技大学,2023.
- [3] 李民.苏伊士油船双层底高度对船体结构强度影响及舫剖面优化设计[D].江苏:江苏科技大学,2023.
- [4] 邓卉,甘进,张正,等.循环载荷下大开口箱型梁弯曲极限强度试验研究[J].中国造船,2023,64(3):1-12.
- [5] 王康.水下耐压壳的结构优化及疲劳特性分析[D].辽宁:大连海事大学,2023.

作者简介: 孙志杰(1983-),男,中国浙江海宁人,本科,工程师,从事船舶工程研究。