

基于多目标优化的海上平台机械设备轻量化设计研究

董建喜

天津北海油人力资源咨询服务有限公司 天津 300451

摘要: 本文聚焦海上平台机械设备轻量化设计, 阐述其需求, 涵盖结构强度、重量、成本限制。分析传统经验设计法、单目标优化法及试验验证周期长的局限。提出基于多目标优化的轻量化设计流程, 包括参数化建模与仿真分析、多目标优化实施步骤、优化结果分析与决策。同时剖析技术、经济、安全风险, 并给出应对策略。通过研究, 旨在为海上平台机械设备轻量化设计提供科学方法与有效保障, 提升设备性能, 降低成本, 保障海上平台安全稳定运行。

关键词: 海上平台; 机械设备; 轻量化设计; 多目标优化; 有限元分析

引言: 在海洋工程蓬勃发展的当下, 海上平台作为关键设施, 其机械设备的性能与成本至关重要。轻量化设计既能提升设备运行效率、降低能耗, 又可减少对平台承载的压力。然而, 传统设计方法在应对复杂海洋工况时存在诸多局限, 多目标优化方法为海上平台机械设备轻量化设计提供了新思路, 本文将深入探讨其设计需求、流程, 剖析潜在风险并给出应对策略, 为海洋工程发展提供有力支持。

1 海上平台机械设备轻量化设计需求

1.1 结构强度要求

结构强度是海上平台机械设备轻量化设计的首要前提, 关乎设备运行的安全与可靠。海洋环境复杂, 强风、巨浪、海流带来周期性或冲击性载荷, 设备自身运行动力载荷引发振动, 多重载荷叠加持续作用于结构。设计时要确保结构在各种载荷组合下不出现塑性变形、断裂等失效, 关键承载部件需精确计算强度参数。海洋盐雾腐蚀会削弱结构强度, 设计要预留腐蚀裕量, 选用耐腐蚀材料或防护工艺。此外, 设备要有足够抗疲劳性能, 长期承受交变载荷不疲劳破坏, 通过计算校核疲劳强度, 优化结构形状与尺寸, 让轻量化结构既轻便又能抵御载荷冲击, 保障设备稳定运行。

1.2 重量约束

重量约束是海上平台机械设备轻量化设计的核心边界条件, 关乎平台整体安全与运营效率。海上平台甲板承载能力有上限, 设备超重会破坏平台受力平衡, 增加倾覆风险, 极端环境下加剧晃动威胁结构安全。重量还影响运输与安装成本, 海上运输空间有限, 超重设备需专用船舶, 增加运输费; 安装需大型起重设备, 受气象影响大, 超重延长安装周期、推高成本。设备重量与平台能耗相关, 超重增加动力系统负荷、提升能耗。所以轻量化设计要严格遵循重量约束, 通过材料优化、结构简化控制

重量, 使设备重量符合要求, 降低各环节成本^[1]。

1.3 成本限制

海上平台机械设备轻量化设计中的成本限制是实现设计方案落地的关键保障, 需贯穿设计、制造、运维全生命周期。设计阶段, 采用新型轻量化材料如高强度铝合金、复合材料等虽能减轻重量, 但材料采购成本通常高于传统钢材, 需精准核算材料成本与轻量化效益的平衡关系, 避免盲目选用高价材料导致成本失控。制造环节, 轻量化结构往往对加工精度要求更高, 如复杂曲面结构的数控加工、焊接工艺的精度控制等, 会增加加工工时与设备投入, 需优化制造工艺方案, 提升加工效率以控制制造成本。后期运维成本也需纳入考量, 部分轻量化材料可能存在维护要求高、更换成本高的问题, 设计时需选择性价比高的材料与结构, 降低长期运维支出。同时, 需建立全生命周期成本核算模型, 综合评估材料采购、加工制造、运输安装、维护保养等各环节成本, 确保轻量化设计方案在满足性能要求的基础上, 整体成本控制预算范围内, 提升方案的经济可行性。

2 海上平台机械设备轻量化传统设计方法局限

2.1 经验设计法

海上平台机械设备轻量化设计采用经验设计法, 局限性明显, 难满足现代海洋工程复杂需求。此方法以设计师长期积累的工程经验为核心, 借鉴历史同类方案调整优化, 缺乏对设备运行工况的精准量化分析。海上平台环境独特, 不同海域工况差异大, 历史经验难全面覆盖, 易致设计方案“一刀切”。要么为安全过度保守设计, 增加设备重量与成本; 要么因经验偏差致强度不足, 有安全隐患。同时, 该方法难以融入新型轻量化材料与结构形式, 设计师受固有经验束缚, 对新技术的认知不足, 无法发挥其轻量化潜力^[2]。设计结果稳定性差, 受个人经验水平影响大, 且缺乏理论支撑与仿真验证,

难实现轻量化与性能、成本的最优平衡。

2.2 单目标优化法

海上平台机械设备轻量化设计采用单目标优化法,局限性突出,无法满足多约束综合设计需求。该方法仅以单一指标为优化目标,如单纯追求重量最小或强度最大,忽视各设计目标间的耦合与制约。以重量最小化为目标,易致结构强度、刚度不足,增加运行风险;以强度最大化为目标,会使设备重量超标,增加成本。海上平台机械设备轻量化需兼顾强度、重量、成本等多重目标,单目标优化法难统筹平衡,易“顾此失彼”。此外,其优化结果局限,无法提供多组可行方案,设计需求细微调整时,需重新优化计算,设计效率低,难以适应复杂多变的设计需求。

2.3 试验验证周期长

海上平台机械设备轻量化设计,传统试验验证方法周期长,制约设计迭代与方案落地。传统试验依赖物理样机制作,海上平台设备结构复杂、体积大,样机制作涉及材料采购、零部件加工、装配调试等多环节,需多厂家协同,耗时久。试验时,要模拟海上复杂工况,传统试验设备难精准复现耦合作用,需分阶段开展多项试验,流程繁琐。海上现场试验受气象条件影响大,台风、暴雨等天气会使试验中断,延长周期。若试验发现问题,需重新调整方案并制作新样机试验,形成反复循环,每次循环耗时数周甚至数月。过长周期增加设计成本,导致设备交付延迟,错过项目工期,难适应海洋工程快速发展。

3 基于多目标优化的轻量化设计流程

3.1 参数化建模与仿真分析

参数化建模与仿真分析是基于多目标优化的海上平台机械设备轻量化设计流程的基础环节,为优化提供精准数据支撑与模型基础。参数化建模阶段,采用专业三维建模软件如SolidWorks、UG等,构建设备整体及关键零部件的参数化模型,将影响轻量化效果的核心参数如结构尺寸、壁厚、材料密度等设为可调整参数,建立参数间的关联关系,确保参数修改时模型能自动更新,提升建模效率与灵活性。建模过程中需严格遵循设备结构原理与工艺要求,保证模型与实际设备的一致性。仿真分析阶段,将参数化模型导入有限元分析软件如ANSYS、ABAQUS等,结合海上平台实际工况,设置风浪载荷、洋流载荷、设备运行载荷等边界条件,模拟设备在不同工况下的应力分布、变形量、振动特性等性能指标。通过仿真分析可精准识别结构冗余部位与强度薄弱环节,明确各设计参数对设备性能与重量的影响规

律,为后续多目标优化提供量化依据,避免盲目优化,提升优化设计的针对性与科学性。

3.2 多目标优化实施步骤

多目标优化实施步骤是基于多目标优化的轻量化设计流程的核心环节,通过系统规划实现各目标协同优化。第一步明确优化目标与约束条件,结合海上平台机械设备需求,将结构强度达标、重量最小化、成本最低化作为核心优化目标,同时设定材料性能、加工工艺、尺寸范围等约束条件,确保优化方向符合实际需求。第二步选择优化算法与工具,根据设计问题复杂度选用合适的多目标优化算法,如非支配排序遗传算法、多目标粒子群算法等,借助专业优化软件如ModeFrontier、Isight等搭建优化平台,实现建模软件、仿真软件与优化软件的协同联动^[3]。第三步设计变量筛选与优化迭代,从参数化模型中筛选出对优化目标影响显著的设计变量,如关键部位壁厚、结构尺寸等,设置变量取值范围,通过优化算法驱动设计变量迭代更新,每轮迭代后自动调用仿真软件计算性能指标,判断是否满足约束条件。第四步生成Pareto最优解集合,通过多轮迭代计算,得到一系列兼顾各目标的非支配最优解,形成Pareto前沿,为后续结果分析与决策提供丰富方案。

3.3 优化结果分析与决策

优化结果分析与决策是基于多目标优化的轻量化设计流程的关键收尾环节,旨在从多组优化方案中筛选出最优落地方案。首先对生成的Pareto最优解集合进行初步筛选,剔除不符合基本工程要求的方案,如存在加工工艺无法实现、材料采购困难等问题的方案,保留技术可行的候选方案。随后开展综合性能分析,采用有限元仿真对候选方案进行再次验证,精准评估各方案的结构强度、刚度、振动特性等性能指标,同时核算各方案的材料成本、加工成本、运输安装成本等,形成完整的性能与成本数据库。在此基础上采用科学评价方法进行决策,结合层次分析法确定强度、重量、成本等目标的权重系数,通过模糊综合评价法计算各候选方案的综合评分。最后组织设计、工艺、运维等多专业人员开展评审,结合工程实际经验对综合评分较高的方案进行最终论证,重点考量方案的可制造性、运维便利性及长期可靠性,最终确定兼顾性能、重量与成本的最优轻量化设计方案。

4 风险分析与应对策略

4.1 技术风险

海上平台机械设备轻量化设计中的技术风险主要源于新技术应用、设计方法复杂性及工况适配性不足等方

面,可能导致设计方案无法实现预期性能。新型轻量化材料如复合材料、高强度合金的应用存在技术风险,这类材料的力学性能受加工工艺影响大,且在海洋腐蚀环境下的长期性能稳定性缺乏足够数据支撑,可能出现材料性能衰减过快的问题。多目标优化设计过程中,仿真模型与实际工况存在偏差,如载荷模拟不精准、边界条件设置不合理等,会导致优化结果与实际性能不符。轻量化结构往往采用复杂拓扑形状或一体化设计,对加工工艺要求极高,传统加工设备与技术可能无法满足精度要求,导致零部件加工质量不达标。应对这些风险需建立完善的技术验证体系,开展新型材料的长期腐蚀试验与力学性能测试,建立精准材料性能数据库;优化仿真模型,结合海上现场实测数据修正载荷与边界条件;提前开展工艺评审,引入高精度加工设备与技术,对关键零部件进行试加工验证,确保加工工艺可行性,降低技术风险。

4.2 经济风险

海上平台机械设备轻量化设计中的经济风险主要表现为成本超支,贯穿设计、制造、验证全流程,影响方案的经济可行性。材料采购环节,新型轻量化材料价格通常高于传统材料,若设计方案过度依赖高价材料,或材料市场价格波动上涨,会导致采购成本超支。制造环节,复杂轻量化结构对加工精度与工艺要求高,需投入高精度加工设备,增加设备购置成本,同时加工工时延长、废品率提升等问题会推高制造成本。试验验证环节,为确保轻量化方案可靠性,需开展多轮仿真与物理试验,尤其是新型结构的海上现场试验,会增加试验设备租赁、人员调配等费用。应对经济风险需建立全生命周期成本管控体系,在设计初期开展成本预算,选用性价比高的材料,避免盲目追求高端材料;优化结构设计,简化复杂结构,降低加工难度;采用数字化仿真替代部分物理试验,减少样机制作与现场试验次数;建立成本动态监控机制,实时跟踪各环节成本支出,发现超支隐患及时调整设计方案,确保整体成本控制在预算范围内。

4.3 安全风险

海上平台机械设备轻量化设计中的安全风险是最关键的风险类型,直接关系到设备运行安全与海上平台人

员生命财产安全,主要源于结构强度不足、稳定性差及应急保障不足等问题。轻量化设计过程中,若为追求重量减轻过度缩减结构尺寸或选用强度不达标材料,会导致设备结构强度、刚度不足,在海上强风、巨浪等复杂载荷作用下易发生变形、断裂等失效事故。部分轻量化结构的抗风稳定性与抗振动性能较差,设备运行时易出现剧烈振动,不仅影响自身使用寿命,还可能引发平台其他设备故障^[4]。另外,轻量化设计可能简化部分安全防护结构,或新型结构的应急维修方案不完善,当设备出现故障时无法及时处理,导致风险扩大。应对安全风险需强化设计阶段的强度校核,采用多工况仿真与极限载荷测试验证结构安全性;引入冗余设计理念,关键承载部位采用双重防护结构;制定完善的应急维修方案,开展针对性应急演练;设备运行过程中安装实时监测系统,实时监控结构应力、振动等指标,及时发现并处置安全隐患。

结束语

海上平台机械设备轻量化设计意义重大,关乎平台安全、运营效率与成本控制。基于多目标优化的设计方法,综合考虑结构强度、重量、成本等多方面因素,有效克服了传统设计方法的局限。然而,设计过程中面临技术、经济、安全等风险,需通过完善验证体系、成本管控、强化安全保障等策略应对。未来,随着技术发展,应持续优化设计方法,提升设计水平,推动海上平台机械设备轻量化设计向更高质量、更高效益方向发展,助力海洋工程事业进步。

参考文献

- [1]马文生,冯志伟,沈妍,等.基于多目标优化算法往复隔膜泵机座轻量化设计[J].机械强度,2024,46(5):1159-1167.
- [2]赵国伟,李薇,张艳琴,等.一种基于多目标优化的制动器底板轻量化设计方法研究[J].南方农机,2024,55(2):147-150.
- [3]陈志刚,黄晓东,杨志伟.海上平台起重机轻量化设计优化及强度分析[J].机械设计与制造工程,2021,46(2):98-102.
- [4]刘晓彤.新材料在机械轻量化设计中的应用研究[J].材料科学与工程,2021,35(5):33-39.