

FPSO上部模块轻量化设计与建造工艺优化研究

李鹏程

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要：随着海洋油气开发向深水迈进，FPSO上部模块的重量控制与建造效率成为制约工程经济性的关键因素。传统设计偏于保守、建造工艺粗放，导致模块自重过大、材料利用率低、施工周期长。本文聚焦轻量化设计与建造工艺的协同优化，提出“材料-结构-工艺”一体化技术路径。在轻量化设计方面，采用高强度钢与复合材料替代传统钢材，结合拓扑优化与模块化集成，降低结构冗余；在建造工艺方面，升级预制精度、焊接工艺、吊装方案及涂装体系，适配轻量化需求。研究表明，该方案能有效减轻模块重量、提升材料利用率、降低制造成本与建造周期。研究成果为FPSO上部模块的高效、经济、绿色建造提供了系统解决方案。

关键词：FPSO；上部模块；轻量化设计；结构优化；建造工艺

引言：FPSO作为深海油气开发的核心装备，其上部模块承担油气处理、动力供应等关键功能，重量通常占船体总重的较大比例。随着作业水深增加与环保要求趋严，传统“安全冗余”设计理念导致模块自重过大，不仅增加船体载荷与系泊负担，也推高了建造与运营成本。当前，轻量化设计与建造工艺优化多被分别研究，缺乏系统性的协同路径。本文以FPSO上部模块为研究对象，从材料选型、结构优化、模块化集成三方面提出轻量化设计方案，并从预制工艺、焊接技术、吊装集成及涂装体系四方面构建建造工艺优化路径，形成设计与施工深度融合的技术体系。

1 相关概念与理论基础

1.1 FPSO上部模块核心内涵与设计要素

FPSO上部模块是布置在主甲板上、承担油气处理与动力供应等功能的多层框架式结构，由工艺、动力、电气、生活模块及火炬塔等组成。层间及与船体之间通过立柱、斜撑连接，底层多采用大截面板拼型钢（PG梁），上层以小截面成品型钢为主。作为“海上移动工厂”，上部模块需在有限空间内实现多系统集成，满足抗风浪、抗腐蚀、抗疲劳等严苛要求，设计寿命长达数十年且不进坞维护。根据相关规范要求，设计需满足三大核心要求：一是重量与重心控制，为未来加装预留冗余；二是结构安全性，承受波浪、横摇等动态载荷；三是功能集成性，实现油气处理等系统的紧凑布局。此外，还需兼顾经济性与可建造性，降低全生命周期成本。

1.2 轻量化设计核心原理与关键要素

FPSO上部模块轻量化设计的核心原理是“在满足强度、刚度、耐腐蚀性及功能需求的前提下，通过材料、结构、工艺的协同优化，最大限度降低模块重量”，本质是

“减重不减效”。其核心要素包括三个方面：一是材料要素，选用轻质高强、耐海洋腐蚀的新型材料替代传统钢材；二是结构要素，通过拓扑优化、参数化设计去除结构冗余，优化截面尺寸；三是集成要素，采用模块化、撬装化集成设计，减少连接部件，提升空间利用率。与传统设计相比，轻量化设计具有三大优势：降低船体载荷与系泊负荷；降低材料消耗与制造成本，提升施工效率；减少能耗与维护成本，符合绿色发展趋势^[1]。同时，也面临减重与强度、耐腐蚀性之间的矛盾等挑战。

1.3 建造工艺与轻量化设计的协同关系

FPSO上部模块的轻量化设计与建造工艺密切相关，二者相互制约、协同优化。轻量化设计为建造工艺优化提供方向，合理的设计方案可简化施工流程；先进建造工艺则为轻量化设计落地提供保障，避免因工艺不足导致设计方案无法实现。例如，模块化集成设计需配套工厂预制与整体吊装工艺，轻质高强材料需适配专用焊接与涂装工艺，结构拓扑优化需依托高精度加工工艺。因此，需结合轻量化设计方案优化建造工艺，实现设计与施工的深度融合，确保轻量化模块的建造质量与效率，同时降低施工成本与安全风险。

2 FPSO上部模块轻量化设计优化

2.1 设计原则与优化目标

FPSO上部模块轻量化设计需遵循“安全优先、功能适配、经济合理、可建造性”四大原则：一是安全优先，确保轻量化后模块的结构强度、刚度、抗疲劳性及耐腐蚀性满足海洋环境作业要求；二是功能适配，轻量化设计不得影响油气处理、动力供应等核心功能的正常运行；三是经济合理，通过材料与结构优化，降低材料消耗与制造成本；四是可建造性，设计方案需适配现

有建造工艺与设备,避免过于复杂的结构设计导致施工难度增加。结合工程实际,确定轻量化设计核心优化目标:在满足相关规范要求的前提下,实现模块重量的有效减轻、材料利用率的显著提升、结构抗疲劳寿命满足设计要求,同时降低制造成本与建造周期。

2.2 核心轻量化设计技术与实施路径

2.2.1 材料选型优化

材料选型是轻量化设计的基础,核心是选用轻质高强、耐海洋腐蚀的新型材料,替代传统普通钢材。结合FPSO上部模块的受力特点与海洋环境要求,优化材料选型方案如下:一是结构主材,采用高强度船用钢替代普通碳钢,其强度显著提升,重量有效降低,同时具备良好的抗冲击性与抗疲劳性;二是次要结构件,采用碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强塑料(GFRP)等新型复合材料,此类材料密度远低于钢材,强度可达钢材的数倍,可使次要结构重量大幅降低,且耐腐蚀性优异,能有效适应海洋高盐雾环境。同时,结合数字孪生技术,针对项目所在海域的腐蚀环境,精准选择材料与涂层体系,降低材料冗余设计系数,降低早期失效风险。此外,优化材料规格,减少材料规格种类,提高材料复用率,降低采购与库存成本,通过钢材下料排版动态优化,显著提升板材利用率,减少废钢产生量与碳排放^[2]。

2.2.2 结构拓扑与参数化优化

采用拓扑优化与参数化设计技术,去除结构冗余,优化结构布局与截面尺寸,实现结构受力合理。借助有限元分析软件,对上部模块框架结构、PG梁、立柱等核心构件进行受力分析,模拟海洋环境下的载荷作用,识别结构冗余区域,通过拓扑优化技术重构结构形态,保留受力核心区域,去除无效冗余结构,有效降低框架结构重量。针对PG梁等关键构件,优化截面尺寸与焊接工艺,采用定制化截面设计替代传统标准化截面,在满足强度要求的前提下减少材料用量;同时优化节点设计,采用一体化节点替代传统拼接节点,减少焊缝数量与连接部件,降低结构重量的同时提升结构整体性与抗疲劳性,避免节点处应力集中。此外,采用参数化设计,建立模块结构参数化模型,可快速调整结构尺寸,对比不同设计方案的重量与性能,筛选最优方案,提升设计效率。

2.2.3 模块化与撬装化集成优化

结合FPSO上部模块的功能特点,采用模块化、撬装化集成设计,将油气处理、计量、动力等功能单元划分为独立的撬块模块,每个撬块在工厂内完成设计、预制与调试,再运输至现场进行整体吊装与集成。这种设

计方式可实现功能单元的紧凑布局,减少模块内部的管线与结构连接,降低结构重量,同时显著提升空间利用率。优化模块划分方案,按功能关联性划分模块,避免模块过大或过小,确保模块重量适配吊装设备能力,同时提升模块复用率,如动力模块、生活模块可根据不同FPSO项目需求调整配置,实现复用。此外,优化模块接口设计,采用标准化接口,确保模块之间、模块与船体之间的精准对接,减少现场整改工作量,为轻量化建造奠定基础,同时适配工厂预制与现场吊装的协同需求。

3 FPSO 上部模块建造工艺优化

3.1 传统建造工艺存在的问题

传统FPSO上部模块建造采用“现场散装施工”模式,结合工厂预制与现场组装,存在诸多弊端,难以适配轻量化模块的建造需求:一是材料利用率低,传统切割、下料工艺精度低,材料浪费严重,增加材料成本;二是焊接工艺落后,轻质高强材料与复合材料的焊接难度大,传统焊接工艺易出现焊缝缺陷,影响结构强度与耐腐蚀性,且焊接效率低;三是施工流程繁琐,现场作业量大,受海洋环境影响显著,施工周期长,且安全风险高;四是质量管控难度大,现场施工环节多,质量波动大,易出现尺寸偏差、焊缝缺陷等问题,整改工作量,影响建造效率与质量。另外,传统建造工艺中,PG梁预制、节点预制等关键工序缺乏专用工装,导致构件变形量大、精度不足,后续整改工作量增加,进一步影响建造效率与轻量化效果。

3.2 建造工艺优化路径与实施措施

3.2.1 预制工艺精度与效率双提升

立足工厂预制的集约化优势,对传统工序进行系统性重塑,从源头提升制造精度并降低现场依赖。首先,革新切割下料技术,将传统火焰切割全面替换为数控等离子与激光切割,加工精度显著提升。结合数字孪生技术优化下料排版,板材综合利用率大幅突破。其次,针对PG梁等关键构件,革新工装体系,定制专用焊接台架配合埋弧焊机;采用腹板两侧对称施焊工艺控制热变形,并通过前置坡口与倒角提升预制精度,减少后期矫正工作量^[3]。最后,构建全流程质量管理体系,对关键构件实施无损检测,确保焊缝合格率,严格监控平面度与垂直度。推行模块化预制,将撬块组装、框架装配等工序前移至工厂完成,大幅缩减现场人力与时间成本,同时有效规避海上气象对施工质量的干扰。

3.2.2 轻质材料焊接工艺精准化升级

针对FPSO上部模块中轻质高强钢及复合材料的焊接瓶颈,进行专项工艺优化,形成“设备-参数-管理”

三位一体的精准化升级方案。针对高强度船用钢,优选熔化极气体保护焊替代传统手工电弧焊,焊接效率显著提升,焊缝成形美观,热输入可控,焊缝强度可达母材较高水平;针对碳纤维增强复合材料,则采用摩擦搅拌焊、激光焊接等先进技术,利用精确热源控制避免树脂烧损、纤维分层及孔隙等典型缺陷,确保复合材料连接区域的力学性能与耐久性。通过系统性工艺试验精准标定不同材料、板厚工况下的最佳电流、电压及焊接速度,严格限定热输入范围,防止过热导致材料性能退化;结合多道焊交替施焊技术,合理分布热输入,有效消解焊接残余应力,抑制变形与裂纹产生。组织焊接操作人员专项培训与资格认证,确保持证上岗并熟练掌握新工艺;建立全周期焊接质量追溯档案,对每道焊缝的工艺参数、操作者信息及无损检测结果进行数字化留存,实现质量可追溯、责任可落实;同时严格执行焊材烘干、发放、回收全流程管理,从源头保障焊材品质。

3.2.3 轻量化模块吊装与现场集成高效化策略

结合轻量化模块的结构特性与重量分布特点,对吊装与现场集成进行精细化设计,形成“方案优化-流程重构-安全管控”的高效化策略体系。首先,动态优化吊装方案,依据模块自重、重心位置、外形尺寸及作业海域海况条件,科学选配浮吊或履带吊等吊装设备,编制专项施工方案,明确吊装次序、空间姿态、吊点布置及防护要点。依托高精度全站仪与实时定位系统,实现模块吊装过程中的精准就位与姿态调整,有效规避碰撞、刮擦及结构变形风险;火炬塔等超大体量构件采用整体吊装技术,减少高空拼装作业,显著提升吊装效率与安全性。其次,重构现场集成流程,推行“工厂预制—整体吊装—快速联调”一体化模式,将管线连接、电气接线、仪表调试等大量集成工作前置至工厂完成,现场仅需通过标准化接口进行快速对接与紧固,大幅缩短现场作业时间^[4]。在现场管控层面,吊装前严格复核模块接口尺寸与船体基座坐标,确保对接精度;集成过程中实施实时变形监测,及时发现并调整偏差;设置防风防雨棚等设施,降低恶劣天气对作业的影响。同时强化安全风险管控,对吊装、高空作业等环节实施常态化隐患排查

与整改,将事故发生率控制在较低水平。

3.2.4 海洋环境适应性涂装工艺体系优化

为应对海洋高盐雾、强腐蚀环境,对上部模块涂装体系进行系统性优化。在涂层选型上,采用“底漆+中间漆+面漆”三层复合方案:底漆选用环氧富锌底漆,中间漆选用环氧云铁中间漆,面漆选用氟碳面漆,协同作用确保卓越附着力与抗腐蚀能力,设计寿命达较长年限。在施工工艺上,升级设备采用高压无气喷涂替代手工喷涂,提升涂层致密度与均匀性,从源头减少针孔、流挂等缺陷。涂装前严格控制基材粗糙度,对有特殊等级要求的项目,制作标准样板作为施工与验收参照,确保基底质量。最后,加强涂装后养护,精确控制温湿度保障涂层完全固化,避免开裂、脱落等问题,并建立完善的质量检测台账,确保最终涂装质量全面达标。

结束语

本文系统研究了FPSO上部模块轻量化设计与建造工艺的协同优化问题,构建了“材料-结构-工艺”一体化技术路径。在轻量化设计层面,通过高强度钢与复合材料的合理选型、拓扑优化去除结构冗余、模块化集成提升空间利用率,实现了模块重量的有效降低。在建造工艺层面,通过数控切割提升预制精度、精准焊接适配轻质材料、高效吊装缩短集成周期、复合涂装增强海洋适应性,确保了轻量化设计的工程落地。未来,随着数字孪生、智能焊接及自动化吊装技术的成熟,轻量化建造将进一步向智能化、绿色化方向演进,为海洋工程装备的升级换代提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1]吴文开,杨玥,杜梦潮,等.基于修正子模型方法的FPSO模块支墩结构强度分析[J].舰船科学技术,2025,47(17):45-51.
- [2]刘传辉,姜立群,石亮,等.FPSO上部模块顶升运输装车方案优化研究[J].石油工程建设,2026,52(1):11-15.
- [3]王晓凯,王阳阳.FPSO管廊模块甲板片的吊装工艺研究[J].舰船科学技术,2025,47(2):173-177.
- [4]代立杨,杨岑磊,徐向奎,等.高集成FPSO模块电缆托架设计的约束研究[J].中国设备工程,2026(5):130-132.