

# 海工平台上部结构模块总体设计与分析

张庆秀<sup>1</sup> 任晓芳<sup>2</sup>

1. 天津博迈科海洋工程有限公司 天津 300456

2. 海洋石油工程股份有限公司 天津 300456

**摘要:** 本文围绕海工平台上部结构模块的总体设计与结构分析展开研究, 阐述其功能分类、设计原则及基础参数, 重点设计总体布局、主体结构与辅助系统方案并进行初步校核。通过构建有限元模型, 开展静力、动力及疲劳分析, 识别结构薄弱环节并提出优化建议。研究兼顾安全性、经济性与环境适应性, 契合海上作业合规要求, 为海工平台上部结构模块的设计、分析及优化提供实用参考, 助力提升平台作业稳定性与耐久性。

**关键词:** 海工平台; 上部结构模块; 总体设计

**引言:** 随着海洋油气、风电等资源开发向深海延伸, 海工平台作为核心作业载体, 其上部结构模块的设计合理性直接决定平台作业安全与效率。当前海上环境复杂多变, 极端海况与腐蚀问题对模块结构提出更高要求, 而传统设计存在适配性不足、运维成本较高等问题。基于此, 本文聚焦海工平台上部结构模块的总体设计与结构分析, 探索科学设计方法与分析路径, 为相关工程实践提供技术支撑, 推动海工装备设计水平提升。

## 1 海工平台上部结构模块总体设计基础

### 1.1 上部结构模块的功能与分类

(1) 上部结构模块的核心功能: 作为海工平台的核心作业与保障载体, 核心功能涵盖三大方面。作业支撑功能为海上油气开采、风电运维等核心作业提供安装基础, 承载钻井、生产处理等关键设备; 物资储运功能负责存储燃油、钻井液、备件等物资, 保障平台持续作业; 生活保障功能为平台人员提供住宿、餐饮、医疗等配套服务, 满足长期海上驻留需求。(2) 常见上部结构模块分类: 按功能可分为作业模块、储运模块、生活模块、动力模块及辅助模块; 按结构形式可分为框架式、箱式、桁架式模块, 其中框架式适用于设备密集区域, 箱式便于预制安装, 桁架式侧重轻量化与抗风性<sup>[1]</sup>。(3) 不同类型模块的设计差异与适用场景: 作业模块侧重结构强度与设备安装兼容性, 适用于油气开采核心区域; 储运模块注重密封性能与载荷分布, 适配物资存储需求; 生活模块优先考虑舒适性与安全性, 用于人员驻留区域; 桁架式模块多用于高空或大跨度区域, 框架式模块适用于浅海平台。

### 1.2 设计原则与核心要求

(1) 安全性原则: 作为首要原则, 需满足强度、稳定性、抗疲劳等核心要求, 确保模块在各类载荷作用下

不发生结构失效, 同时具备抗倾覆、抗断裂能力, 保障人员与设备安全。(2) 经济性与实用性原则: 设计中兼顾材料节约, 优先选用性价比高的材料, 优化结构布局减少耗材; 同时考虑施工便捷性, 采用预制化设计便于海上安装, 降低施工成本, 兼顾后期维护便利, 减少运维工作量。(3) 环境适应性原则: 需适应海上复杂环境, 具备较强的抗风浪、抗腐蚀能力, 能抵御极端海况(如台风、巨浪)的冲击, 采用防腐涂层与耐候材料, 延长模块使用寿命。(4) 合规性要求: 严格符合海上平台相关设计规范与行业标准, 涵盖结构设计、安全防护、环保等方面, 确保设计成果通过相关审核, 满足海上作业合规要求。

### 1.3 设计输入条件与基础参数

(1) 环境条件参数: 核心包括波浪高度、周期、水流速度、风速等环境载荷数据, 需结合平台作业海域的实测数据, 作为结构抗风浪、抗载荷设计的核心依据。(2) 载荷条件参数: 涵盖设备重量、作业载荷、模块自重、风载荷、波浪载荷等, 需精准核算各类载荷的大小与分布, 确保结构设计满足载荷承载要求。(3) 材料参数与选型依据: 优先选用高强度钢材、耐海水腐蚀材料等, 明确材料的屈服强度、抗拉强度等核心参数, 选型需兼顾强度、防腐性与经济性, 适配海上恶劣环境。(4) 平台寿命与自持天数等基础设计指标: 明确平台设计寿命(通常为20-30年), 确定平台自持天数, 以此为基础设计物资存储容量、动力供应系统, 保障平台长期稳定作业。

## 2 海工平台上部结构模块总体设计方案

### 2.1 总体布局设计

(1) 布局设计原则: 以工艺流程顺畅为核心, 确保油气开采、处理、储运等各环节衔接有序, 减少物料输

送距离与管线损耗；严格控制各区域安全距离，划分危险区域与非危险区域，规避火灾、爆炸等安全隐患；兼顾操作维修便捷性，合理预留操作空间与检修通道，便于设备日常维护、故障排查及应急处置，提升平台作业效率。（2）核心区域布局：井口区布置在平台核心位置，靠近作业设备，优化井口间距，保障钻井、采油作业顺畅；油气处理区紧邻井口区，集中布置分离、净化等设备，减少管线长度；生活区布置在非危险区域，远离噪音、振动源，配套住宿、餐饮、医疗等设施，保障人员居住舒适度；应急区域单独划分，设置应急通道、集合点及应急设备，满足突发情况处置需求<sup>[2]</sup>。（3）设备与管线布局优化：统筹规划各类设备布置，避免设备之间、设备与结构之间发生干涉，合理预留设备吊装空间与检修场地；管线布局遵循“短、直、顺”原则，分类布置油气、水电、消防等管线，做好管线固定与防护，避免管线交叉缠绕，便于后期吊装、检修与维护，降低运维成本。

## 2.2 主体结构设计

（1）甲板结构设计：对比框架式、箱式、桁架式等甲板结构形式，结合平台载荷特点与作业需求，选取性价比、施工便捷的结构形式；根据设备重量、作业载荷及环境载荷，计算确定甲板厚度，校核甲板刚度，确保甲板能够承受各类载荷作用，避免变形过大影响设备运行与人员操作。（2）框架结构设计：主梁、次梁布置遵循受力均匀原则，主梁沿平台长度方向布置，次梁垂直于主梁，优化梁间距，提升框架整体承载能力；结合结构受力情况，选型主梁、次梁的截面形式，优先选用高强度钢材，兼顾强度与经济性，确保框架结构稳定可靠。（3）连接结构设计：节点连接采用焊接连接为主、螺栓连接为辅的方式，关键节点采用全焊透焊接，明确焊接工艺要求，控制焊接质量，避免焊接缺陷；螺栓连接用于需拆卸的部位，选用高强度螺栓，确保连接强度与密封性，同时做好节点防腐处理，延长连接结构使用寿命。

## 2.3 辅助系统集成设计

（1）防腐防护系统设计：采用涂层防护与阴极保护相结合的方式，甲板、框架等外露结构涂刷耐海水腐蚀涂层，明确涂层厚度与施工工艺；对水下及隐蔽部位采用阴极保护技术，减缓海水腐蚀速度，同时定期检查防腐效果，及时补涂涂层，保障结构长期稳定。（2）消防与救生系统设计：严格遵循行业规范，合理布置消防设施，包括消防栓、灭火器、消防管线等，划分消防分区，确保火灾发生时能够快速灭火；配置救生艇、救生筏、救生衣等救生设施，设置清晰的逃生通道与指示标识，保障人员应急逃生安全<sup>[3]</sup>。（3）公用设备系统布局：

主电站、热站等公用设施集中布置在专用区域，靠近负荷中心，减少能源损耗；优化公用设备布局，预留检修空间，确保设备运行稳定，同时合理布置水电管线，保障平台各系统正常供电、供热、供水。

## 2.4 设计方案初步校核

（1）初步强度与刚度校核方法：采用简化计算与有限元初步分析相结合的方式，核算主体结构、关键构件的强度，验证结构是否满足载荷承载要求；计算结构变形量，校核刚度指标，确保结构变形控制在允许范围内，避免影响平台正常作业。（2）布局合理性与合规性校核：核查总体布局、核心区域及设备管线布局的合理性，判断是否满足工艺流程与操作维修需求；对照海上平台设计规范与行业标准，校核布局安全距离、消防布置等是否合规，确保设计方案符合相关要求。（3）设计方案的可行性评估：结合施工工艺、材料供应、成本预算等因素，评估设计方案的施工可行性与经济性；参考同类工程实例，分析设计方案的合理性与可靠性，排查潜在问题，提出优化方向，确保设计方案能够顺利落地实施。

## 3 海工平台上部结构模块结构分析

### 3.1 结构分析模型建立

（1）有限元模型构建：结合上部结构模块的结构特点，选取壳单元、梁单元及实体单元组合建模，甲板、框架面板采用壳单元，主梁、次梁采用梁单元，关键连接节点采用实体单元，确保模型精准性；网格划分采用结构化与非结构化结合方式，关键受力部位加密网格，非关键部位适当简化，平衡计算效率与精度；边界条件设定贴合实际，模拟平台与下部结构的连接方式，设定约束条件，避免模型失真。（2）材料模型与载荷施加：材料模型采用弹塑性模型，计入材料的腐蚀余量与疲劳特性，结合海上腐蚀环境，合理设定材料强度折减系数；载荷施加遵循叠加原则，依次施加自重载荷、设备载荷、环境载荷（波浪、水流、风速），明确各载荷的大小、方向及作用位置，模拟实际作业工况下的载荷分布，确保载荷施加贴合实际<sup>[4]</sup>。（3）模型验证与修正：结合海上平台设计规范要求，对比规范中的力学性能指标，验证模型合理性；参考同类工程实例的分析数据，调整模型参数，修正网格划分、边界条件及载荷施加中的不合理之处，确保模型能够准确反映结构实际受力状态。

### 3.2 静力分析

（1）静态载荷作用下的应力分析：重点分析静态载荷组合作用下，甲板、框架主梁、连接节点等关键部位的应力分布情况，识别应力集中区域，核算最大应力值，确保其不超过材料许用应力，同时检查应力分布是否均

匀,避免局部应力过高导致结构损坏。(2)结构变形分析与刚度验证:通过静力分析获取结构整体及局部变形数据,重点核查甲板、框架等关键部位的变形量,与设计允许变形值对比,验证结构刚度是否满足要求;针对变形超标的部位,分析原因,为后续结构优化提供依据,确保结构在静态载荷下不发生过度变形,保障设备正常运行与人员操作安全。(3)屈曲分析:针对框架立柱、主梁等关键受压构件,开展屈曲分析,核算构件的临界屈曲载荷,校核其稳定性,避免构件在静态载荷作用下发生屈曲失效;结合构件截面形式、受力情况,优化构件布置与截面尺寸,提升受压构件的抗屈曲能力。

### 3.3 动力分析与疲劳分析

(1)动态载荷作用下的动力响应分析:模拟波浪、水流等动态载荷的作用特性,分析结构的动力响应,获取结构加速度、速度、位移及应力随时间的变化规律,评估动态载荷对结构的影响,确保结构在动态载荷作用下能够保持稳定,避免产生过大振动。(2)模态分析:开展结构模态分析,计算结构的固有频率与振型,识别结构的薄弱振动模态,对比动态载荷的频率范围,避免结构固有频率与动态载荷频率接近,防止共振现象发生;针对可能出现的共振风险,提出结构优化措施,调整结构刚度或质量分布。(3)疲劳分析:基于前期获取的载荷数据,编制载荷谱,采用雨流计数法统计载荷循环次数,结合材料疲劳特性,核算关键部位的疲劳寿命,校核其是否满足平台设计寿命要求;重点分析焊接节点、应力集中区域等易疲劳部位,评估疲劳损伤程度,为疲劳防护与结构优化提供依据<sup>[5]</sup>。

### 3.4 分析结果评价与优化建议

(1)分析结果与设计规范的对比评价:将静力分析、动力分析及疲劳分析结果,与海上平台结构设计相关规范、行业标准进行对比,评价结构设计是否满足规范要

求,重点核查应力、变形、疲劳寿命等关键指标,确认设计的合规性与安全性。(2)结构薄弱环节识别:结合各类分析结果,识别结构中的薄弱环节,主要包括应力集中严重部位、变形超差区域、抗屈曲能力不足的受压构件及疲劳寿命不达标的部位,明确薄弱环节产生的原因,为后续优化提供明确方向。(3)针对性优化改进建议:针对识别出的薄弱环节,提出针对性优化建议,如对应力集中部位进行圆角过渡处理、增厚甲板或加大框架截面尺寸提升刚度、优化受压构件布置增强抗屈曲能力、对易疲劳部位加强焊接质量控制与防腐防护等,确保结构性能满足设计要求,提升结构安全性与耐久性。

### 结束语

本文系统完成海工平台上部结构模块的总体设计与结构分析,明确设计原则、方案及校核方法,通过多维度结构分析验证设计合理性,针对薄弱环节提出优化措施,有效兼顾了安全性、经济性与环境适应性。研究虽形成完整设计分析体系,但在深水复杂工况下的优化设计仍有提升空间。后续可结合实际工程案例,深化疲劳防护与轻量化设计研究,进一步完善设计体系,助力海工装备向高效、安全、低碳方向发展。

### 参考文献

- [1]郝永庆.海工平台单元模块化设计的研究[J].山东工业技术,2020,(12):133-134.
- [2]方鹏.散货船机舱铁舭优化单元模块化设计方法[J].船舶物资与市场,2022,30(09):13-15.
- [3]张明,李强.海洋工程上部组块结构设计关键技术研究[J].船舶工程,2022,44(S1):156-160.
- [4]刘建国.基于BIM技术的海洋平台钢结构深化设计应用研究[J].中国海洋平台,2023,38(2):45-51.
- [5]赵鹏飞.Tekla软件在海工模块钢结构设计中的应用与实践[J].海洋工程装备与技术,2024,11(1):88-93.