

基于现场实际条件的大型钢结构吊装路径与方案优化分析

蒋宇锋 黄志光 潘勤涛

常州中车铁马科技实业有限公司, 江苏 常州 213000

[摘要]在现代船舶建造与舾装过程中,大型钢结构吊装是决定关键节点工期与施工安全的重要环节。由于船体结构复杂、作业空间受限、水域环境特殊、安全要求严苛,因此需在充分评估现场条件基础上,优化吊装路径与作业方案。文中聚焦于船厂及船体建造现场,结合吊装设备布置、构件运输路径、吊装顺序及多设备协同等核心因素,系统阐述吊装路径的设计原则与优化技术,提出多方案比选和动态调整策略,适用于各类船舶建造和大型舾装件安装作业场景,有效提升吊装作业的安全性与施工效率,为实现高质量、高效率、可控性的船舶建造提供技术支撑。

[关键词]钢结构吊装;船厂现场;路径优化;吊装方案;作业协同

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17184

中图分类号: TU758

文献标识码: A

Optimization Analysis of Lifting Path and Scheme for Large Steel Structures Based on Actual On-site Conditions

JIANG Yufeng, HUANG Zhiguang, PAN Qintao

CRRC Changzhou Tech-Mark Industrial Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

Abstract: In the process of modern shipbuilding and outfitting, the hoisting of large steel structures is an important link that determines the key node construction period and construction safety. Due to the complex structure of the ship, limited working space, special water environment, and strict safety requirements, it is necessary to optimize the lifting path and operation plan based on a thorough assessment of the site conditions. The article focuses on shipyards and ship construction sites, and combines core factors such as lifting equipment layout, component transportation path, lifting sequence, and multi equipment collaboration to systematically explain the design principles and optimization techniques of lifting paths. Multiple scheme comparison and dynamic adjustment strategies are proposed, which are applicable to various types of ship construction and large-scale outfitting installation scenarios, effectively improving the safety and construction efficiency of lifting operations, and providing technical support for achieving high-quality, high-efficiency, and controllable ship construction.

Keywords: steel structure hoisting; shipyard site; path optimization; lifting plan; homework collaboration

引言

现代船舶,尤其是大型油轮、集装箱船、特种工程船等,在建造过程中大量使用整体舾装模块、大型甲板结构件、大型滑轨、桁架段等钢结构部件,其吊装作业复杂度显著高于一般建筑工程。传统吊装路径设计多依据理论最短路径或理想环境设定,往往忽略实际船坞、码头、平台区域的狭窄空间、潮汐波动、平台不平整,以及构件安装精度要求,极易造成吊装不畅、构件损伤甚至施工安全事故。本文立足船厂建造一线,通过典型案例分析现场制约因素,提出吊装路径与方案优化策略,为大型船舶钢结构件吊装提供实用指导。

1 船厂现场条件分析

1.1 船体结构周边空间限制与施工交通组织

船舶大型构件吊装一般发生于船坞、浮码头或总装平台,其空间分布通常呈纵向狭长、两侧设备密集。船坞内起重设备的布置、构件运输车行走路径受限于龙门吊轨道、作业通道、临时设施等,特别是在双船并行施工或夹缝空间作业中,吊装干涉风险极高。因此必须通过三维激光扫描或数字建模方式,对船体周边空间、构件行进路线、起

吊点及安全回转半径进行精确建模,提前规划出安全通行区、待吊区及风险高点。施工交通需与总装计划协调一致,合理设置运输窗期,减少与其他施工单元交叉干扰,同时布设临时交通标志、反光标线、作业引导员,保障钢构件吊运路径畅通无阻。

1.2 滑道地基承载力与设备站位限制

船厂大型吊装多采用岸吊、轨道吊或大型履带式吊车,尤其在安装上层建筑、大型舾装模块时,常面临设备地基承载力不足、滑道沉降等问题。码头区域常因回填土沉降或受海水侵蚀导致承载力下降,需通过静载试验评估站位安全性,必要时铺设钢板道轨或混凝土地基,增加荷载扩散层。起重设备布置需避开压载舱口、燃油区、进气管道、走道平台等关键部位,确保吊臂作业范围覆盖吊装点,避免跨越式作业引发重心失稳。多设备联合作业时,应通过模拟软件(如Navisworks、Bentley LiftPlanner)对臂架动态干涉、吊点受力、转运路径进行仿真分析,确定最佳组合站位与作业顺序。

1.3 构件堆放逻辑与船坞内运输路径管理

船舶钢结构件多为异形、非标、长宽高不等的块体结

构,如舷侧模块、平台支架、起重基础、桅杆基座等,其堆放方式必须与吊装工序密切对应。构件应以“先装优先、近岸靠近”为原则,统一编号、分区存放,确保“运输—起吊—安装”三点间路径最短。船坞通道设计应满足500吨以上构件运输平台车的轴荷与转弯半径要求,地面铺设钢轨或加固垫层以避免重复碾压损坏,同时配备导航灯、雷达指引、人员引导系统,提高夜间或狭窄工况下的吊运安全性。部分构件若需通过驳船转运,还需规划与潮汐节律相协调的对接方案,避免起吊时因潮差过大导致构件高度错位或脱吊风险。

2 吊装路径规划原则

2.1 吊装最短路径与避障原则

在船体建造及舾装阶段,大型钢结构件如舾装平台、桅杆基座、舷外装置等的高空吊装对路径规划提出极高要求。科学规划吊装路径的核心是实现构件从堆放区到船体安装部位的最短安全路径,此路径不仅需满足最小距离原则,更要符合船坞或平台的可达性、设备动作的稳定性以及作业空间的安全冗余。需提前识别所有可能造成吊装干涉的因素,如已装结构、临时防坠护栏、登船跳板、排水沟盖板、舾装支架、电缆托架、照明杆等障碍物。在路径规划过程中应结合船厂三维建造模型(如船舶数字孪生平台)开展空间模拟,精准计算吊装路径的水平距离、垂直起落高度、高差变化及旋转幅度,动态优化起重机吊臂动作曲线,减少设备空转及重复移动。对因船体结构狭窄或设备遮挡导致难以避障的情况,应通过提前拆除临时设施、设立吊装窗口或调整构件装配顺序等方式进行规避,从而提升整体吊装连贯性与安全稳定性。

2.2 起重设备作业范围与转运路径

船厂内常用的门座吊、浮吊、履带吊或轨道吊等设备,其吊装作业覆盖范围直接影响路径布局和作业组织效率。由于船体上甲板布置复杂,舾装设备密集,需确保起重设备选型合理、作业点定位科学,确保目标安装区域处于设备额定作业半径内,避免出现超半径起吊或设备偏位造成力矩失衡。设备布置需结合结构重量、重心位置、作业节拍等因素合理选择站位,防止“拉斜绳”或“吊中转”作业方式带来不稳定性。多台起重设备协同作业(如多浮吊同步起吊舾装模块)时,应清晰划分作业责任区,制定统一指挥调度方案并设置互锁限位,避免吊臂交叉干涉。设备转运路径应避开滑道盲区、泵舱口、边缘坡口等风险地带,同时考虑潮汐高差或平台位移,必要时采用钢轨铺设、可调节支撑坡道、转运限位装置等辅助手段,保障设备在穿越坞底、跨区吊装等复杂路径中的稳定性和可控性。合理的设备布置与路径统筹能有效减少等待与回转时间,提高船体多工序并行下的施工效率。

2.3 构件运输与临时支撑衔接设计

大型钢结构件(如舷侧桁架、模块化平台、集中舾装段)从堆场运输至船体安装点,其路径设计需与吊装过程

形成系统化、无缝衔接。构件运输路径应充分考虑舾装区实际空间、平台通道宽度、过梁高度及转向半径,优先选择无障碍、短距离、低扰动路线,并合理设置导向员、转向缓冲区及限高限宽提示标识。针对曲折区域或高差较大的码头边装平台,可配备低平板车、液压转向车或同步导向系统实现精准转运。构件进入安装区域前应提前设置可调式临时支撑平台或插装框架,支撑结构设计要兼容构件结构特征与落位精度要求,并具备可调节、可快速拆卸和重复利用的特性。临时支撑必须满足风载、水位变化、间断作业等不利工况下的稳定性要求,防止构件位移、下沉或倾覆。将构件运输路径与吊装节奏、支撑结构动态整合,可有效减少构件落位前的等待时间,提高精装舾装过程中的连续作业能力与安全保障水平。

3 吊装方案设计要点

3.1 吊装分区与分段次序安排

在大型船舶建造或模块化舾装过程中,钢结构件吊装需依据船体分段结构和总装工序科学划分吊装区域。一般按作业属性可划分为主甲板区、上建区、舾装平台区、艙部桅杆区等功能分区,各分区构件按图纸模块化集成,提升作业集中度与调度效率。吊装顺序原则上遵循“自中心向两侧”“自低至高”“先主后辅”原则,确保结构整体稳定性和构件安装连续性。

3.2 起重机选型与作业半径匹配

船厂吊装设备通常包括浮吊、门座吊、履带吊等,选型需结合构件尺寸、质量、吊装高度和码头地形综合考虑。设备必须满足最大荷载下的安全裕度,作业半径应覆盖目标安装区域并预留转动与避让空间。例如艙部区域的高空桅杆吊装可选用高功率履带吊配合辅助转运平台,保证吊装起点至船体安装点间的吊距稳定可控。若面临结构复杂或吊装跨度过大情形,可采用双吊或多吊联合作业方案,并提前进行力学仿真分析与吊点协同设计,确保提升过程动态平衡。合理选型和半径匹配既能控制设备使用成本,也可有效规避因起重量不足或路径受限引发的风险。

3.3 吊装过程同步与协同控制策略

船舶吊装工程中常涉及多构件、多设备协同作业,施工组织需高度同步化。尤其是船体外段拼接、主甲板整体吊装、长桁架平台等吊装任务,必须通过集中控制平台实现多吊点同步提升,确保构件不因受力不均而发生变形或失衡。推荐使用具备负载实时反馈与姿态修正能力的数字化吊装系统,并在作业中引入施工可视化手段,如BIM吊装仿真、无人机巡检、全流程进度管控系统等,提升吊装透明度与响应能力。现场各工种如设备操作、运输调度、信号指挥等应统一指挥、密切配合,形成高效、稳定的吊装协同网络,确保船体吊装各阶段顺利推进、安全受控。

4 方案比选与优化方法

4.1 多方案建模与模拟分析

船舶大型钢结构吊装往往涉及多套可行路径与设备

组合方案,其前期技术决策需依托三维建模与模拟分析。基于船坞或码头现场条件,将不同的起重机布置、构件安装顺序及路径方案输入 BIM 平台,建立带有真实设备参数和构件尺寸的空间模型。通过施工仿真软件进行吊装路径模拟、构件碰撞检测、临时支撑布置评估等工作,全面对比不同方案在资源配置、作业时间、空间协调方面的优劣。仿真分析应同步考虑构件堆放空间、起重设备转场频率、操作盲区等实际限制,辅以工程经济指标分析如设备利用率、吊装时长、施工成本等,明确最优方案选型依据,从而确保所选方案具备较高的可执行性与经济性。

4.2 吊装流程仿真与瓶颈识别

针对船体模块或舾装段的吊装流程开展动态仿真,可有效识别施工组织中的关键瓶颈与潜在风险。仿真内容应覆盖构件从码头堆放、转运平台移动、起吊路径到船体定位全过程,重点分析作业节拍、设备利用冲突、高空定位干涉、潮差影响等关键因素。如发现构件交叉运输、设备等待时间长、构件定位误差大等问题,可通过调整起吊顺序、改变堆放位置或优化协同节点予以化解。利用流程仿真数据优化施工组织逻辑和资源调度安排,可实现船体吊装任务的动态排程,提高全流程运行效率,减少等待与干扰,有效提升船坞作业节奏与施工节拍。

4.3 方案动态调整与应急预案制定

船舶吊装现场存在海况变化、潮汐影响、空间冲突等多种不确定因素,吊装方案必须具备动态调整能力和完善的应急响应机制。如遇大风停工、构件吊耳偏移、起重机突发故障等情况,应能迅速切换备用设备、调整路径、修改作业计划。在初期方案设计中就需制定多套关键路径变更方案、构件替代运输路线和设备增援策略,同时依托数字化调度平台实现现场状态感知与数据共享,确保吊装指令实时同步、进度动态可控。通过建立“计划—监测—反馈—调整”闭环机制和灵活应急体系,可实现吊装全过程在多变环境下的稳态运行与高效推进,保障船体结构件吊装任务安全、精准、可控完成。

5 安全与效率双重保障策略

5.1 吊装过程的风险点识别与控制

船舶建造过程中,大型舾装模块、上建结构或桅杆平台等吊装作业普遍面临高空、重载、潮汐、风压等多种不稳定因素。风险识别是保障安全的第一道防线,应通过作业前的风险评估机制识别吊装各环节的重点风险源。常见问题包括:吊点选择偏差导致构件受力不均或翻转;吊装路径与桅杆、雷达塔等高耸设备发生干涉;强风突发影响吊钩稳定;作业人员协调失误导致指令错误等。针对上述风险,应设定明确的风险控制措施,如限定风速上限(通常不超过 6 级)、配置防摇摆吊具与限位装置、制定标准操作规程、开展作业前技术交底与应急演练。作业中须安排专业安全员全过程旁站监督,特别是在高空对接、换索操作、夜间作业等关键节点,确保防范措施真正落地执行,

杜绝重大安全隐患。

5.2 吊装指挥系统与实时监控技术

为实现船舶吊装作业的高精度和智能化,需建立集成化吊装指挥系统与实时监控平台。吊装指挥应由具备资质的船厂吊装调度人员统一指挥,利用船坞调度系统协调构件进场、设备联动与信号传输,避免指令混乱。采用无线通讯与语音识别技术能提高指令传达效率,尤其适用于嘈杂或远距作业场景。通过部署高清视频监控、载荷感应器、GPS 吊钩定位系统等技术手段,实现对吊装过程的动态监测与轨迹跟踪,并将监测数据上传至施工云平台,便于远程监管、趋势分析及故障预警。此类智能系统不仅能实时识别异常状态、防范操作偏差,还能在事故发生后提供回溯依据,为安全管理提供重要数据支撑。

5.3 施工组织协调与作业效率提升措施

吊装效率的提升依赖于施工组织的系统化与多工序协同能力。在船体模块化建造模式下,应合理编排起重作业、构件运输、临时支撑、焊接定位等工序节点,做到一环接一环、无缝衔接。利用施工组织管理平台进行任务下发、现场信息回传与资源协调,使施工节奏更可控,任务状态更透明。推进标准化作业流程,统一各工序操作规程和质量验收标准,避免因人为操作差异引发效率波动。同时,按工程进度科学分配作业班组与设备资源,动态调配人员与机械,降低空闲率与资源浪费。通过构建“统一调度、集中管控、分级执行”的组织机制,强化精细化施工管理,最终实现船体吊装工程的安全、高效、规范推进。

6 结语

综上所述,大型船舶钢结构吊装工程面对作业空间受限、结构复杂、工序密集等挑战,需从现场条件出发,科学规划吊装路径、优化设备配置、强化协同控制与风险管理。通过多方案建模、流程仿真与动态调整机制,实现了吊装作业的安全、高效、可控。本文研究成果可为船舶建造现场的大型构件吊装提供系统化技术支撑,推动施工管理向智能化、精细化发展,具有良好的实践指导价值。

[参考文献]

- [1]张千一.三跨空间梁拱组合钢结构桥梁安装技术研究与应用[D].济南:山东建筑大学,2024.
- [2]梁子康.大型场馆折面异形金属屋面施工技术应用与研究[D].合肥:安徽建筑大学,2024.
- [3]张磊.大跨度钢桁架结构变轨累积滑移施工关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [4]程梦琪.基于箱式钢结构模块化建造体系的中小学教学建筑设计研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [5]宗德新.基于 DFMA 的装配式钢结构住宅设计研究[D].重庆:重庆大学,2022.

作者简介:蒋宇锋(1982.4—),男,常州工学院,机械设计制造及其自动化,常州中车铁马科技实业有限公司,工段长,高级技师,高级工程师。