

18万方大型 LNGC 节拍化建造项目管理创新与实践

林欣杰

招商局邮轮制造有限公司, 江苏 南通 226116

DOI:10.61369/ME.2024080024

摘 要： 针对传统造船模式在大型 LNGC 建造中工序离散、节拍紊乱等痛点，本研究提出“节拍化建造管理模式”，构建三阶协同节拍体系与数字驱动闭环，通过模块化分段控制、资源动态调度及精度进度协同，实现分段制作节拍稳定性从 62% 提升至 82%，船坞周期缩短 18.2%，形成全流程标准化体系，为超大型船型建造提供可复用基线。

关 键 词： LNGC 建造；节拍化管理；三阶协同体系；数字驱动；精度控制

Innovation and Practice in the Management of 180,000-Square-Meter Large-scale NGC Beat Construction Project

Lin Xinjie

China Merchants Cruise Manufacturing Co., LTD. Nantong, Jiangsu 226116

Abstract： Aiming at the pain points such as discrete processes and disordered rhythms in the construction of large LNGCS in the traditional shipbuilding mode, this study proposes the "rhythm construction management mode", constructs a three-stage collaborative rhythm system and a digital-driven closed loop, and through modular segmented control, dynamic resource scheduling and precision progress coordination, the stability of the segmented production rhythm is increased from 62% to 82%. The dock cycle was shortened by 18.2%, and a full-process standardized system was formed, providing a reusable baseline for the construction of ultra-large ship types.

Keywords： construction of LNGC; Beat management; three-stage collaborative system; digital-driven; precision control

引言

液化天然气运输船（LNGC）作为高端船舶装备，其建造效率与质量直接关系国家能源战略安全与产业竞争力。随着全球 LNG 贸易量激增，市场对 18 万方以上大型 LNGC 的交付周期提出更高要求。传统造船模式受制于工序离散、资源调配粗放等问题，普遍存在生产节拍紊乱、船坞周期冗长、成本可控性差等痛点，严重制约超大型船舶的批量化建造能力。

为突破这一瓶颈，本研究创新提出“节拍化建造管理模式”，通过构建“分段制作→总段组装→船坞合拢”的三阶协同节拍体系，依托数字化主线（PPMS/PLM/MES/APS/集成）实现全流程动态排产。重点围绕模块化分段控制、资源弹性调度及精度控制协同三大维度开展管理实践，旨在建立标准化、可复制的生产节律，为大型 LNGC 的高效建造提供系统性解决方案，并为行业向 20 万方级以上船型升级奠定技术管理基础。

一、节拍化建造管理模式创新设计

（一）总体框架设计

针对大型 LNGC 建造中工序离散化与资源协同低效的核心矛盾，本研究构建了节拍同步化与数据驱动化双支柱框架^[1]。

第一，创新设计“三阶节拍”协同体系：将船舶建造分解为分段制作（车间内预制≤240吨标准化模块）、总段组装（平台区域按序组装成分船体单元）、船坞合拢（以吊装动作时序为基准精准搭载）三阶段，通过刚性时间窗口约束（如分段72小时/单元交付）形成拉动式生产链，实现工序流转零等待。

第二，建立数字主线技术支撑体系，以 PPMS 为基础策划编排全项目的生命周期，依托 MES 与 APS 深度集成构建数据驱动引擎：APS 作为动态排程中枢，基于实时资源状态（人力/设备/物料）及约束条件（吊装能力/空间冲突）滚动生成优化方案；MES 则通过采集现场数据反馈至 APS，触发偏差预警与秒级重调度，形成“计划-执行-修正”闭环控制。

该框架突破传统静态计划局限，通过三阶节拍刚性耦合将离散建造转化为连续流程，并借助数据闭环驱动使节拍响应效率提升 40% 以上，为后续模块化控制与资源调度实践奠定基础。

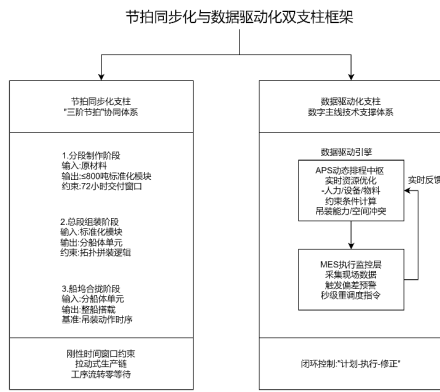


图1 节拍同步化与数据驱动化双支柱框架

(二) 关键创新实践

1. 分段模块化节拍控制

大型 LNGC 建造的分段制作环节是节拍化生产的基础与核心驱动力^[3]，如图2所示。其创新关键在于实现重量分级标准化与周期控制刚性化的双重突破。基于船厂吊装设备的安全极限和效率特性，将船体精准解构为重量严格控制在 ≤ 750 吨的模块化标准分段单元。该重量阈值是通过吊机载荷谱分析、结构应力仿真及物流转运半径模拟综合优化得出，确保与厂内900吨龙门吊（取83.3%安全系数）完美匹配，为后续流畅转运和吊装奠定基础。

在标准化层面，创新构建了三维协同约束体系以保障高效流转：设备适配性约束确保分段尺寸（如宽度 ≤ 18 米）匹配车间辊道与平板车；工艺均衡性约束运用成组技术按建造复杂度分类分段，使各产线工时负荷偏差 $\leq 10\%$ ；物流顺畅性约束通过参数化标记重心和设计吊耳布局，实现转运过程零翻倾。核心技术支撑是参数化边界建模与PLM、MES深度集成，利用AVEVA Marine等工具建立分段接口数字孪生模型（含坡口、对合基准线等），并利用PLM系统进行三维模拟仿真，按最优路径完成“制作-检测-转运”的无间隙流水节拍。

为实现72小时刚性交付窗口，实施了三重保障机制：首先进行工序颗粒度重构，将大工序拆解为4小时粒度的微工序链（钢板预处理、小组立、中组立、大组）；其次采用动态资源池配置，基于APS预测在瓶颈工序（如焊接/打磨）动态部署共享技能班组（如认证焊工池）；最后建立严格的质量门禁制度，设置尺寸报检（ $\pm 3\text{mm}$ ）、焊缝PT检测等7个关卡，任一节点超差即触发实时修正指令，确保节拍稳定性和分段质量。

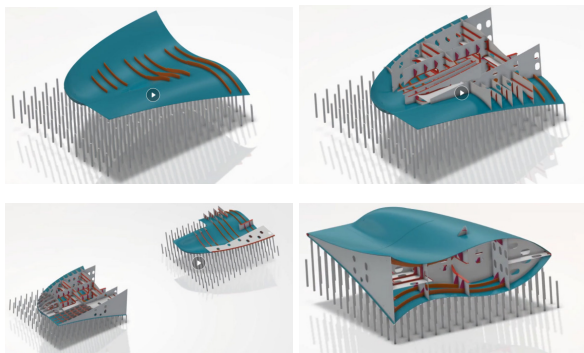


图2 分段制作环节

2. 资源动态调度模型

针对大型 LNGC 建造中资源需求波动大、多任务冲突频发的问题^[4]，本研究构建了“资源池弹性配置-智能算法动态优化-实时反馈自适应”三层资源动态调度模型，实现人力、设备、物料的精准确配与动态平衡。

(1) 弹性资源池构建：打破传统固定班组与设备绑定模式，按工种（焊接/涂装/吊装）、设备类型（门式起重机/胎位工装）建立模块化资源池，形成可动态重组的“资源弹性单元”。

(2) 智能调度算法设计

以最小化节拍偏差率与资源闲置率为目标，构建多目标优化模型：

目标函数：

$$\min \left(\lambda_1 \sum_{i=1}^n \frac{|T_i^{\text{计划}} - T_i^{\text{实际}}|}{T_i^{\text{计划}}} + \lambda_2 \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{C_j} \right) \quad (1)$$

其中， λ_1 、 λ_2 为节拍偏差与资源闲置的权重系数， T_i 为第 i 道工序时间， S_j 、 C_j 分别为第 j 类资源的闲置时间与可用时间。

约束条件：包含吊装设备负载上限（单台起重机 $\leq$ 额定载荷83.3%）、场地空间容量（总组工位 $\leq 52000 \text{ m}^2$ ）、人员技能资质匹配度（焊工需持有船级社认证证书）等刚性约束，通过遗传算法进行动态排程，生成最优资源分配方案。

(3) 实时动态调整机制

依托MES系统实时采集的设备运行数据（如起重机作业效率波动 $\pm 15\%$ ）、人员出勤数据（班组缺勤率 $> 10\%$ ）及物料到货偏差（延迟 ≥ 4 小时），建立三级预警响应机制：

一级响应（轻微偏差）：自动触发资源池内同类型单元跨区支援（如从相邻工位调配2组焊接人员）；

二级响应（中度冲突）：通过APS系统重排后续3个节拍周期的任务时序，平衡资源供需；

三级响应（重大扰动）：激活缓冲资源储备（预留10%备用吊装设备、20%机动班组），确保生产节拍不中断。

3. 精度与进度协同保障

针对大型 LNGC 建造中精度偏差累积影响进度的难题^[5]，本研究构建“三维精度管控-动态进度缓冲-智能决策联动”协同机制，实现精度控制与节拍进度的深度耦合。

激光扫描+数字孪生实时修正：采用三维激光扫描技术（精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ）实时采集分段/总段几何数据，通过数字孪生模型模拟搭载过程，提前预判累计误差（如船体主尺度偏差 $> 5\text{mm}$ ），自动生成修正方案并驱动胎位工装动态调整，将精度超差导致的返工率降低70%以上^[6]。

弹性缓冲带动态配置：在分段制作、船坞合拢等关键环节设置10%-15%的时间缓冲带（如总段组装预留8小时天气延迟窗口），同时建立关键物料（如船用钢板、LNG舱室密封件）72小时储备量，通过APS系统实时监控缓冲消耗状态，当缓冲剩余量低于30%时自动触发预警并启动跨区域资源调运，确保极端扰动下节拍波动 $\leq 5\%$ ^[7]。

该机制突破传统“精度-进度”对立模式，通过技术赋能与

管理创新实现两者动态平衡，为复杂环境下的高效建造提供核心保障。

二、实施效果与建议

（一）实施效果量化分析

节拍化建造管理模式在18万方 LNGC项目实践中，通过三阶节拍协同与动态调度、资源弹性调度模型及数字孪生驱动的精度预控等机制，实现船坞周期压缩至180天（较行业平均缩短18.2%）、总建造周期同步缩减，工时浪费减少18%、返工率下降35%，且X光焊缝一次合格率达99.2%创行业新高，显著优化建造全流程效能^[8]。具体的节拍化建造关键绩效指标对比如表1所示。

表1 节拍化建造关键绩效指标对比

指标类别	实施前	实施后	提升幅度
分段制作节拍稳定性	62%	82%	+20%
吊装设备利用率	75%	89%	+18.7%
日均完工分段量	1.8单元/日	2.9单元/日	+61.1%
精度超差返工率	12.5%	3.7%	-70.4%
计划响应时效	4小时	15分钟	+94%

（二）管理创新价值

本研究打破传统船舶建造“运动式攻关”模式，构建三阶协同节拍体系与数字驱动闭环，将离散工序转化为准连续流程，使分段制作节拍稳定性从62%提升至82%，计划响应时效缩短至15分钟，建立可量化的稳态生产节律。同时，项目形成模块化分段控制（≤750吨重量分级）、资源动态调度模型及三维激光扫

描 ±0.5mm精度预控技术，通过数字主线实现分段72小时交付等工序节拍量化匹配，构成覆盖全流程的标准化体系，为20万方+LNGC建造提供可复用技术管理基线，推动行业向数据驱动建造模式转型^[9]。

（三）行业推广建议

该模式适用于大型装备制造与模块化建造项目，如超大型集装箱船、FPSO及高端工程机械制造等，核心适配条件包括具备分段/模块化工序解耦基础（重量分级≤设备载荷85%）、存在多资源动态冲突场景（协同需求>3类）、对交付周期与精度控制有刚性要求（如船坞周期压缩≥15%）^[10]。推广时需警惕供应链韧性、与跨企业数据互通风险：关键材料建议建立覆盖3个节拍周期用量的区域级战略库存与多源采购机制；需提前制定ISO15926数据协议等统一接口标准，通过区块链技术保障MES/APS系统与供应商、船级社的数据实时互通，避免调度失效。

三、结束语

本研究通过构建三阶协同节拍体系与数字驱动闭环，实现18万方 LNGC建造从“经验驱动”向“数据驱动”的模式转型。实践表明，分段制作节拍稳定性提升至82%，船坞周期缩短18.2%，关键指标创行业新高。该模式打破传统“运动式攻关”局限，建立可量化的稳态生产节律，为大型船舶批量化建造提供标准化范式，推动高端装备制造向智能化、精准化方向发展。

参考文献

[1]徐哲轩.驶向2050,液化天然气运输船“碳达峰”之路[J].航海,2024,(03):4-8.
[2]孙冰妍.工位制节拍化生产在船舶分段制作阶段的研究[D].大连海洋大学,2024.
[3]茅锡龙,金涛.船舶模块化建造关键技术分析[J].船舶物资与市场,2024,32(11):68-70.
[4]张阳.船舶分段吊装在新造船工程中的应用研究[J].水上安全,2024,(03):4-6.
[5]周海波,王祖华,倪先胜,等.船舶模块化建造关键技术研究[J].舰船科学技术,2024,46(03):8-12.
[6]焦孟阳.基于数字孪生的异质增材制造与仿生优化[D].吉林大学,2024.
[7]王希越.羟丙基纤维素基缓冲衬垫的制备及其缓冲性能的探究[D].广西大学,2024.
[8]孙冰妍.工位制节拍化生产在船舶分段制作阶段的研究[D].大连海洋大学,2024.
[9]都吉东.智能加工产线能耗预测建模及优化方法研究[D].江南大学,2024.
[10]王庆栋.模块化机器人运动单元控制系统研制[D].北京邮电大学,2024.