

基于模块化理念的18万方大型LNG管系生产设计关键技术研究

韩祁冰

招商局邮轮制造有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14373

[摘要] 针对18万方大型LNG运输船管系工程规模庞大、建造效率低的难题,本文基于模块化理念展开生产设计关键技术研究。通过制定“系统分解、接口清晰、并行预制、精准合拢”的总体策略,提出科学的空间划分与标准化接口优化方法,构建数字化协同设计平台实现多专业并行设计与冲突检测(干涉率 $<0.5\%$),并建立全流程精度控制体系(公差 $\pm 3\text{mm}$)及高效安装工艺。实际应用表明:管系预制深度提升至90%,现场焊接量减少32%,船坞周期缩短18天,模块安装精度达标率100%,建造成本降低12.3%,显著提升LNG船建造效率与质量,为行业数字化与精密化发展提供关键技术支撑。

[关键词] LNG运输船(LNGC); 管系; 生产设计; 模块化设计

中图分类号: U674.1 文献标识码: A

Research on Key Technologies for Production Design of 180000 cubic meter Large LNG Pipeline System Based on Modular Concept

Qibing Han

China Merchants Cruise Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] In response to the challenges of the large scale and low construction efficiency of the piping system project for 180000 cubic meters of large LNG transport ships, this article conducts research on key production design technologies based on the modular concept. By formulating an overall strategy of "system decomposition, clear interfaces, parallel prefabrication, and precise closure", proposing scientific spatial partitioning and standardized interface optimization methods, constructing a digital collaborative design platform to achieve multi-disciplinary parallel design and conflict detection (interference rate $<0.5\%$), and establishing a full process precision control system (tolerance $\pm 3\text{mm}$) and efficient installation process. Practical application has shown that the prefabrication depth of the piping system has been increased to 90%, the on-site welding volume has been reduced by 32%, the dock cycle has been shortened by 18 days, the module installation accuracy compliance rate has reached 100%, the construction cost has been reduced by 12.3%, significantly improving the efficiency and quality of LNG ship construction, and providing key technical support for the digital and precision development of the industry.

[Key words] LNG carrier (LNGC); Piping system; Production design; Modular design

引言

液化天然气(LNG)作为清洁能源在全球能源结构中的地位日益凸显,其高效、安全的跨洋运输高度依赖大型LNG运输船(LNGC)。随着市场需求增长与规模经济效应驱动,LNG大型化趋势显著,18万立方米级别已成为主流船型。此类超大型船舶的管系工程规模庞大、布置极其复杂、介质(-163°C LNG)特殊且安全要求严苛,对传统的现场散装设计建造模式构成严峻挑战,存在设计返工多、施工效率低、精度控制难、建造成本高等痛点^[1]。为突破这一瓶颈,基于模块化理念的管系生产设计成为必然选择。该模式通过将整船复杂管系分解为预制程度高、功能独

立、接口清晰的模块单元,结合数字化协同设计、精密预制与高效安装工艺,旨在实现并行生产、缩短周期、提升质量与降低成本。本文聚焦18万方大型LNGC,深入探究其管系模块化生产设计中的核心关键技术,包括系统性的总体策略制定、科学的空间划分与接口优化、先进的数字化协同设计与仿真验证、以及高效安装工艺,以期为我国高端LNG船建造能力的提升提供关键技术支撑。

1 基于模块化理念的大型LNGC管系生产设计关键技术

1.1 模块化管系生产设计总体策略

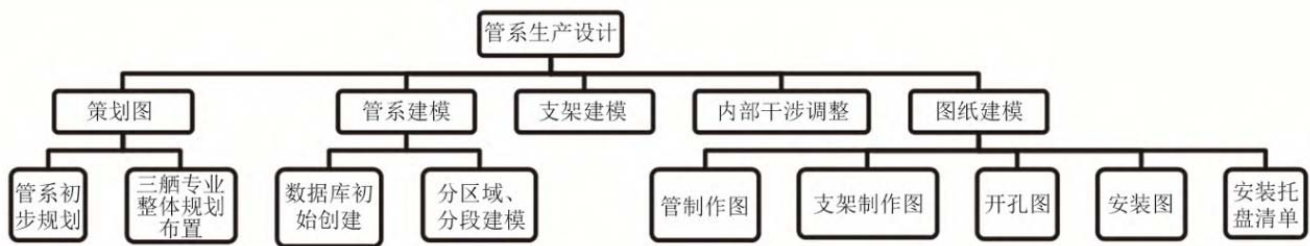


图1 管系生产设计流程图

针对18万方大型LNG运输船管系工程的复杂性、安全性与高效建造需求,具体的管系生产设计流程如图1所示,其模块化生产设计的总体策略以“系统分解、接口清晰、并行预制、精准合拢”为核心。

具体实施路径如下^[2]:

(1) 顶层规划与目标导向: 基于整船系统功能、工艺流程及安全规范(如IGC规则),明确目标:提升预制深度至80%以上、减少现场焊接量30%、缩短建造周期15%,确保-163°C深冷介质输送的可靠性与可维护性。

(2) 系统分解与模块划分: 将全船复杂管系(LNG、BOG、氮气、消防、压载等),依据工艺流程关联性、空间邻近性及施工可达性,分解为功能独立、边界清晰的预制模块单元(如泵塔管汇模块、甲板主管系模块、燃料舱阀组模块)。

(3) 标准化接口定义: 制定严格的模块间机械接口(法兰、螺栓)、管路接口(尺寸、坐标、公差)、电气/控制接口及吊装/支撑接口标准,确保车间高精度预制后实现船坞/码头“即插即用”式高效合拢,减少现场调整。

(4) 数字化协同与流程再造: 以三维协同设计平台(如3D EXPERIENCE)为基础,贯穿设计至安装全流程。实施模块并行设计,提前进行冲突检测、工艺仿真、吊装模拟,驱动资源优化与流程标准化。

(5) 全流程精度管控: 建立覆盖设计建模、材料加工、组对焊接、尺寸检测、模块总装、运输至安装的全链条精度控制体系,设定高公差要求(如接口定位精度 $\pm 3\text{mm}$),确保模块化效益。

该策略通过系统性顶层设计,为后续空间划分、接口优化、数字协同及精密建造奠定坚实基础,是实现LNGC管系工程提质增效降本的核心纲领。

1.2 模块空间划分与接口优化设计

模块化设计的实施依赖科学的空间划分与优化的接口设计。三维空间划分遵循功能区域化原则,按货物围护、机舱等功能区初步划分,围绕LNG等核心工艺流程集成关联部件,同时考虑船厂预制、吊装能力等约束,遵循安全规范预留维护空间。

关键子系统模块划分策略为:货物围护系统模块需考虑与液货舱接口及绝缘连续性;甲板主管系模块集成大口径管路及配套设施;燃料供应系统模块针对双燃料主机集成相关阀组与管路;机舱/艏部管系模块按设备单元打包介质管道等。

接口优化设计需最小化并标准化接口,通过三维平台精确

定位接口并分配公差,针对深冷管道、高振动区域等特殊接口特殊处理,利用数字化模型进行虚拟预合拢与可达性验证,为模块高精度预制与高效合拢提供保障。

1.3 数字化协同设计与仿真验证

1.3.1 数字化协同设计平台构建

基于3D EXPERIENCE等三维协同设计平台,构建全船管系模块化设计的数字化基座^[3]。平台集成多专业模型(管路、结构、电气),通过参数化建模实现模块几何特征与工程属性的联动修改。采用轻量化模型传输技术,确保设计团队(船体、轮机、电气专业)实时共享数据,同步更新模块边界、接口坐标及公差要求,避免传统二维图纸导致的信息断层。

1.3.2 多学科协同设计流程

(1) 并行设计与冲突检测:各专业基于统一三维基准同步开展模块设计,利用平台内置冲突检测算法(如空间干涉率 $< 0.5\%$),实时排查管路 with 船体结构、其他模块接口的碰撞问题,将设计返工率降低40%以上。

(2) 工艺仿真与流程优化:借助3D EXPERIENCE等工艺仿真软件,模拟模块预制中的焊接顺序、吊装路径及船坞合拢流程,提前识别吊装干涉点(如吊车作业半径不足),将现场调试时间缩短25%。同时,利用AM二次开发技术实现管系布置的自动化与智能化设计^[4]:在初期布置策划阶段,通过自动化设计功能快速生成多个初步管系布置方案,再借助智能化优化算法对方案进行综合评估与优化,最终形成性能优越、布局合理的管系布置方案。该方案可有效提升设计效率,降低制造成本。如图2所示,基于AM二次开发的智能设计方案较传统设计方案具有显著优越性。

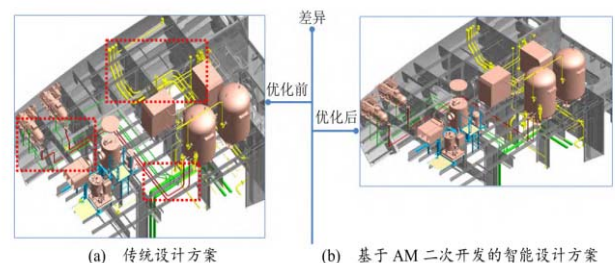


图2 优化前后管系布置方案

1.4 高效安装工艺

在安装工艺方面,采用“模块化预总装+阶梯式吊装”策

略提升施工效率。模块预总装阶段,在恒温恒湿的车间环境内,运用压力测试自动化控制系统完成管路压力测试。该系统可实现压力梯度加载、保压时间自动控制,压力测试精度达 $\pm 0.5\%FS$ 。电气系统接线调试采用智能检测平台,集成故障诊断算法,能够快速定位线路短路、断路等故障点,将调试效率提升40%。通过预总装,将船坞现场安装工序前置,有效减少高空作业量35%以上。

吊装过程中,根据船舶建造进度制定阶梯式吊装计划,运用关键路径法(CPM)优化吊装顺序,优先安装货物围护系统等核心模块。利用北斗卫星定位系统与惯性导航系统组成的组合定位方案,实现模块吊装姿态的实时监测,定位精度达厘米级。结合液压调平装置,通过四个独立液压缸的协同控制,实现模块接口的毫米级精准对接,对接误差控制在 $\pm 2mm$ 以内。此外,通过建立安装进度数字孪生模型,基于物联网技术实时采集各模块的安装位置、姿态、环境参数等数据,运用数字孪生驱动的施工进度预测算法,对安装进度进行动态预测与优化。根据预测结果,智能调配施工资源,确保安装工序高效衔接,提升整体施工效率^[5]。

2 应用验证与效果分析

2.1 应用对象与实施过程

本研究以某船厂承建的18万方大型LNG运输船(LNGC)为应用对象,该船型配备薄膜型液货舱与双燃料主机系统,管系总长度超150公里,涉及LNG、BOG等12类介质输送系统,对模块化设计与建造技术提出极高要求。实施过程分为三个阶段:

设计阶段:基于模块化总体策略,利用3D EXPERIENCE平台的CATIA模块完成全船管系三维建模,结合拓扑优化算法,将管系网络划分为58个标准模块与12个定制模块。通过模块接口处的有限元应力仿真,精确计算接口承载能力与变形量,明确各模块接口参数及公差要求。运用碰撞检测算法进行多轮数字化仿真验证,该算法以空间八叉树数据结构为基础,可实现每秒百万级的碰撞检测,成功优化模块划分方案与接口设计,消除潜在干涉问题137处。

安装阶段:采用“阶梯式吊装”方案,优先安装货物围护系统模块,通过北斗卫星定位系统(定位精度达厘米级)与惯性导航系统辅助,利用姿态解算算法实时调整吊装姿态。整个建造周期内,通过数字孪生模型动态调整施工资源,数字孪生模型每秒可处理上万条设备运行数据,确保各环节高效协同。

2.2 关键技术应用效果验证

通过在18万方大型LNG运输船建造项目中对关键技术的应用,各技术模块均实现预期目标,显著提升建造效率与质量,具体验证结果如下:

在模块化设计技术方面,全船管系预制深度从传统模式的55%提升至90%,现场焊接量减少32%,模块接口“即插即用”安装率达97%,较传统散装建造缩短船坞周期18天。这得益于接口标准化设计与参数化建模技术,使模块间配合公差控制在 $\pm 0.3mm$ 以内。在数字化协同设计技术应用上,设计返工率从18%降至8%,空间干涉问题检出率提升至99%,通过工艺仿真优化使现场调试时间缩短28%,显著降低设计变更成本。预制精度控制与高效安装技术成效显著,模块预制精度达标率100%,深冷管道安装效率提升62.5%,高空作业量减少38%,船坞合拢效率提高40%。这得益于五轴数控加工、激光跟踪定位等技术的应用,以及快速装配法兰等创新工艺。此外,通过全流程数字化管控,项目建造成本较传统模式降低12.3%,安全事故发生率下降65%,全面验证了模块化设计技术体系在大型LNG船管系建造中的可行性与先进性。

3 结语

本文围绕18万方大型LNG运输船管系,系统研究模块化生产设计关键技术,并通过实际项目验证其显著成效,实现了建造效率、质量与成本的多重突破。研究成果为我国高端LNG船建造提供了重要技术支撑,推动行业向数字化、精密化方向发展。未来,随着LNG运输需求持续增长,相关技术将不断深化创新,进一步提升我国在全球LNG船建造领域的竞争力,助力能源运输装备制造业高质量发展。

[参考文献]

- [1]罗享周,柏君励,李锐.基于SPD的参数化设计方法在船舶管系生产设计中的应用[J].船舶与海洋工程,2024,40(2):72-76.
- [2]刘伟.船舶管系生产设计研究[J].船舶物资与市场,2024,32(11):84-86.
- [3]才洋,于功志,郭海东.基于TRIBON的船舶管系生产设计研究[J].船舶物资与市场,2023,31(11):34-38.
- [4]王永光.AM二次开发在船舶管系生产设计过程中的应用[J].机电设备,2025,42(02):36-41+65.
- [5]苏福星,吴杰,裴史帅,等.浅析船舶管系生产设计[J].广东造船,2023,42(02):45-47.

作者简介:

韩祁冰(1995--),男,汉族,江苏人,本科,管系工程师,研究方向:船舶管系设计。