

海上石油平台机械设备安装技术优化措施

高建超¹ 孙佳迎¹ 尹龙¹ 于勇²

1 天津智能制造分公司, 天津市滨海高新区, 300384;

2 海洋石油工程股份有限公司, 天津市滨海新区, 300452;

摘要: 本文聚焦海上石油平台机械设备安装技术, 分析得出该领域存在安装精度控制难(受风浪、空间限制)、流程协同性差(多环节衔接断层)、恶劣环境下安全防护不足三大问题。随后提出针对性优化措施: 通过动态实时校准(构建传感器网络、闭环控制)与模块化预制(拆解、工厂生产、精准运输吊装)突破精度瓶颈; 依托BIM+数字孪生系统(数据收集、三维建模、实时互动)提升全流程协同效率; 应用智能安全防护(传感器监测、预警机制)与长效防护涂层(科学选型、规范施工)强化环境适应性, 为设备安装提供系统解决方案。

关键词: 海上石油平台; 机械设备; 安装技术; 优化

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 01. 019

引言

海上石油平台处于风浪频发、高盐雾的特殊环境, 其机械设备安装质量直接影响石油开采效率与作业安全。当前, 该领域安装工作面临多重挑战: 动态环境导致精度校准难度骤增, 多环节协同不畅易引发工期延误与成本超支, 恶劣环境下的安全防护与设备防腐技术也存在明显短板。为解决这些问题, 满足海上石油开发对设备安装的高标准要求, 本文围绕安装技术的优化路径展开研究, 旨在提出切实可行的改进方案, 推动海上石油平台机械设备安装水平提升。

1 海上石油平台机械设备安装技术存在的问题

1.1 安装精度控制难度大, 易引发设备运行隐患

海上环境的动态干扰与空间限制, 会导致机械设备安装精度难以稳定达标。首先, 环境因素易引发精度偏差: 海上平台受风浪、潮汐作用持续晃动, 而核心设备对安装基准的平面度、同轴度要求极高, 在动态晃动场景下, 传统静态找平校准方法难以精准适配, 进而产生偏差。其次, 海上平台甲板面积仅为陆地同类厂房的 1/3, 大型设备需通过分段吊装、高空组对完成安装, 受空间条件限制, 极易出现分段对接错位的情况。

1.2 安装流程协同性差, 工期与成本失控风险高

海上石油平台机械设备安装涉及陆地预制、海上运输、现场吊装、管线连接、调试验收等多个环节, 各环节协同不足会直接导致整体效率低下。其中, 陆地预制与海上现场作业衔接存在断层, 且多专业交叉作业易引

发协调混乱, 这两类问题均会对安装工作的系统性与稳定性产生负面影响。

1.3 恶劣环境下安装安全与防护技术不足

海上高盐雾、强腐蚀、突发气象等环境特性, 对安装过程的安全性及设备防护提出了极高要求, 而当前相关技术存在明显短板: 一方面, 安装作业的安全防护风险突出; 另一方面, 设备安装后的防护措施不彻底, 极易引发安装失效。因此, 需针对恶劣的海上环境, 做好技术指标与参数的设计优化, 以此提高整体安装水平。

2 海上石油平台机械设备安装技术优化措施

2.1 引入动态实时校准与模块化预制安装技术, 突破精度控制瓶颈

现阶段, 在海上石油平台机械设备安装环节, 相关单位应引进动态实时校准机制, 并结合模块化预制安装技术, 以此突破精度控制瓶颈。

2.3.1 动态实时校准

(1) 识别

在动态实时校准方面, 相关单位需构建一套高精度传感器网络系统, 该系统需能实时精准采集机械设备安装过程中的位置坐标、角度偏差、垂直度等各类关键参数, 且传感器需具备高灵敏度, 以适应海上复杂多变的环境条件, 确保采集数据的准确性与可靠性。随后, 基于采集到的实时数据, 运用经大量实验验证与优化的先进算法模型进行快速分离和处理, 该算法模型需能精准识别安装过程中的微小偏差, 并及时生成分层校准指令,

指令需精确到具体的校准参数与校准量,为后续校准操作提供明确指导。

例如,某海上石油平台二期原油外输泵组安装项目中,该泵组负责原油向运输油轮输送,安装精度直接影响效率与密封可靠性(泵轴同轴度每超 0.1mm,密封件寿命缩短 30%),项目团队引入动态实时校准与模块化预制安装技术突破精度瓶颈。团队构建高精度传感器网络,含 8 台激光位移传感器(量程 0-50mm、精度 $\pm 0.01\text{mm}$)与 4 台双轴倾角传感器(-15° 至 $+15^\circ$ 量程、 0.001° 分辨率),固定于电机底座、泵体法兰、轴承箱等关键部位,通过防水接头适配海上环境,实时采集水平坐标、法兰垂直度、轴承箱倾角等参数。基于采集数据,运用经 300 余次实验优化的最小二乘偏差识别算法,先以卡尔曼滤波消除平台 $\leq 2\text{mm}$ 晃动干扰,再对比设计标准(水平度 $\leq 0.1\text{mm/m}$ 、同轴度 $\leq 0.05\text{mm}$),识别微小偏差(如泵体法兰 0.03mm/m 垂直度偏差),由系统自动生成分层校准指令,明确校准部位、方向与量值(如泵体法兰上端支撑点垂直向下 0.02mm)。

(2) 动态校准的闭环控制

在执行校准操作时,工作人员需配备具备高精度、高稳定性与可远程控制特点的专业校准设备,操作人员可根据校准指令,通过远程控制系统对校准设备进行精准操作,实现对机械设备安装位置的实时调整,确保安装精度始终处于可控范围内,且整个校准过程需持续对传感器数据进行监测与分析,根据数据变化及时调整校准策略,进而形成动态校准的闭环控制。

例如,校准配备 2 台电动液压千斤顶(50kN 载荷、 $\pm 0.005\text{mm}$ 精度)与 4 台 $\text{M}24 \times 1.5$ 手动微调螺栓(每圈 0.75mm 调节量),操作人员通过工业以太网连接的远程控制台(延迟 $\leq 100\text{ms}$)执行指令:启动千斤顶以 0.01mm/s 速度顶推目标部位,实时查看传感器数据,达标(如垂直度 0.01mm/m)后用螺栓固定防回弹。系统持续监测,发现泵体调整引发电机底座 0.04mm/m 水平偏差,更新指令后再次微调(电机底座右侧上移 0.03mm),形成“采集-识别-指令-执行-反馈”闭环,确保精度可控。

2.3.2 模块化预制

(1) 模块拆解

在模块化预制安装技术方面,其执行核心在于前期的模块化设计:相关单位需依据海上平台机械设备的结

构特点与安装要求,将其拆解为多个独立且完整的模块,每个模块的设计需充分考虑标准化与通用性,以便于后续预制生产与安装组合;同时,需精确确定各模块之间的连接方式与接口尺寸,确保各模块能准确对接、紧密配合。

例如,依泵组结构(电机、泵体、密封系统等 5 部件)与安装要求(螺栓孔同轴度 $\leq 0.02\text{mm}$),可拆分为“电机-底座”“泵体-密封”“油路-连接件”3 个独立模块。设计兼顾标准化,如电机底座螺栓孔用数控加工中心($\pm 0.005\text{mm}$ 精度)加工,底部预设 4 个 50mm 直径 H7 公差定位销孔;通过 SolidWorks 模拟对接,确定法兰刚性连接(配合间隙 $\leq 0.01\text{mm}$)与接口尺寸(外径 380mm 法兰、 320mm 中心圆、8 个 $\text{M}20$ 螺栓孔)。

(2) 预制模块生产

在预制模块生产阶段,需建立严格的生产工艺流程与质量管控体系,从原材料采购、加工制造到模块的组装修试,每个环节都要严格开展质量检测与验收,确保每一个模块的尺寸精度、形状精度与性能指标均符合设计要求,且预制过程需在专业工厂内进行,利用先进生产设备与工艺技术,提高模块预制质量与生产效率。

在上述项目中,可选 ISO9001 认证陆地工厂生产,建立全流程管控:原材料 Q345R 钢板(20mm 厚)检测力学性能(抗拉 $\geq 490\text{MPa}$)与成分(碳 $\leq 0.20\%$);用数控等离子切割机($\pm 0.5\text{mm}$ 精度)下料,焊接机器人($180\text{--}220\text{A}$ 电流)焊接,振动时效设备($20\text{--}100\text{Hz}$)消应力;模块组装后,三坐标仪($\pm 0.001\text{mm}$ 精度)测同轴度,压力机做 1.5 倍设计压力(2.4MPa)水压试验(保压 30 分钟无渗漏);合格后喷 $80\text{--}100\mu\text{m}$ 防锈漆、贴追溯二维码。

(3) 运输与吊装

在完成模块预制后,需开展模块的运输与吊装规划,根据海上石油平台的地理位置与现场环境,选择合适的运输工具与吊装设备,制定详细的运输与吊装方案,方案中需明确模块的装卸方式、运输线路、吊装顺序及安全措施,确保模块在运输与吊装过程中不受损坏,并能准确无误地安装到指定位置。

例如,依平台(渤海、 15m 水深、12 级最大风速)环境,用 2 艘 3000 吨级 DP-2 运输船,甲板铺 100mm 丁腈橡胶缓冲垫,以 4 组 30mm 钢丝绳索具(破断 $\geq 500\text{kN}$)固定模块(重心两侧 1.5m 设固定点)。选 2 台 250 吨级门座起重机(30m 半径、 50m 高度、 $\pm 5\text{mm}$ 精度),按

“电机模块-泵体模块-油路模块”顺序吊装：前调试起重机（钢丝绳张力差 $\leq 5\%$ 、变幅误差 $\leq 0.1\text{m/min}$ ），模块装 20mm 防风导向绳（破断 $\geq 200\text{kN}$ ）；过程中低速（ 0.5m/min ）对接定位销（配合间隙 0.02mm ），最终安装精度达标（同轴度 $\leq 0.03\text{mm}$ 、水平度 $\leq 0.08\text{mm/m}$ ）。

2.2 构建 BIM+数字孪生系统管理技术体系，提升全流程协同效率

构建 BIM+数字孪生系统管理技术体系，能够有效提升海上石油平台机械设备安装全流程的协同效率，具体实施需分阶段推进。

2.2.1 数据收集

在前期需开展全面且细致的数据收集工作，收集范围涵盖海上石油平台所处海域的地理信息（包括海底地形、水位变化）、平台所在区域的气象数据（如风速、浪高、潮汐规律等），这些数据是构建精准数字孪生模型的基础环境要素；同时，需收集机械设备自身的详细参数（如设备的几何尺寸、重量分布、重心位置、安装接口规格等），以及设备的设计图纸、技术说明书等文档资料，确保对设备结构、功能与工程原理有深入理解。

2.2.2 利用 BIM 技术创建三维模型

在数据收集基础上，利用 BIM 技术创建三维模型，将收集到的各类数据进行精准录入与整合，使 BIM 模型能真实反映海上石油平台的物理结构与机械设备的实际状态，为后续数字孪生模型构建提供基础数据支撑，保证两个模型在数据层面的一致性与关联性。

2.2.3 构建数字孪生模型

在完成数据整合后，相关单位需着手构建数字孪生模型：该模型需具备高度仿真性，不仅要精确模拟海上石油平台的物理实体与机械设备的外观形态，更需深入模拟其内部工作原理与运行机制，通过建立复杂的数学模型与算法，对设备运行状态、性能参数进行实时模拟与预测（例如模拟设备在不同工况下的应力分布情况）；同时，需建立起 BIM 模型与数字孪生模型之间的实时互动机制，利用物联网技术在海上石油平台的机械设备上安装位移传感器、压力传感器、温度传感器及其他类型的传感器，这些传感器能实时采集设备的运行数据，并将数据传输至数字孪生模型中。数字孪生模型根据接收到的实时数据对自身模拟状态进行动态更新，同时将更新后的信息反馈给 BIM 模型，使 BIM 模型能及时反映设备的实际运行状况，实现两个模型的双向数据流动与同

步更新，为全流程协同管理提供实时数据依据。

2.3 应用智能安全防护与长效防护涂层技术，强化环境适应性

在海上石油平台机械设备安装过程中，需充分考虑外部环境的干涉与影响，相关单位需引进智能安全防护与长效防护涂层技术，以此提升设备安装质量、强化环境适应性，具体实施需分两部分推进。

2.3.1 智能安全防护技术应用

第一部分是智能安全防护技术的应用，相关单位需在平台关键区域或机械设备的关键部位（如动力系统、传动装置、电气控制柜等）安装涵盖温度、湿度、压力、振动、位移等类型的高精度传感器，这些传感器需具备高灵敏度、高可靠性与抗干扰能力，以适应海上恶劣环境；通过有线或无线通信技术，将传感器与中央控制单元进行可靠连接，确保数据传输稳定、及时。

中央控制单元作为智能安全防护系统的核心，需具备强大的数据处理与分析能力，能够接收并解析来自各传感器的数据，同时可运用先进的算法模型对设备的运行状态进行实时评估，识别设备过热、异常振动等潜在安全隐患。

基于大数据分析结果，还需建立安全预警机制，根据不同风险等级设定相应的预警阈值，当监测数据超过阈值时，系统需及时发出声光报警信号，并将预警信息准确推送至相关管理人员的终端设备，以便管理人员迅速采取应对措施。

2.3.2 长效防护涂层技术的应用

长效防护涂层技术的应用是强化海上石油平台机械设备环境适应性的关键环节。

（1）涂层选型

在涂层选型阶段，工程师需结合海上环境特殊性（包括高盐雾、高湿度、强紫外线等因素对涂层的侵蚀作用），选择具备优异耐盐雾性、耐候性与耐化学腐蚀性的涂层材料（如环氧富锌底漆、聚氨酯面漆等），并根据机械设备的材质、使用部位与预期使用寿命等因素进行综合评估与选型。

（2）涂层施工

在涂层施工前，工程师需对机械设备进行严格的表面预处理，包括除锈、除油、打磨等工序，确保设备表面清洁度达到规定标准，以提高涂层与基材的附着力。在涂层施工过程中，需严格控制施工环境条件（如温度、

湿度、风速), 确保在适宜环境下进行涂装作业, 同时可采用先进的喷涂设备与技术, 保证涂层的均匀性与厚度一致性, 避免出现涂层过薄或过厚的问题, 对于结构复杂的机械设备部件, 需采用特殊的喷涂工艺或辅助工具, 确保涂层能全面覆盖、无死角。在涂层施工完成后, 需对涂层进行严格的质量检测, 包括涂层厚度检测、附着力测试、耐盐雾测试等, 确保涂层质量符合设计要求。

3 结束语

总体来说, 本研究针对海上石油平台机械设备安装的核心问题提出的优化措施, 不仅在技术层面突破了传统安装的局限——动态实时校准与模块化预制的结合, 实现了高精度安装的稳定可控; BIM+数字孪生系统的应用, 重构了全流程协同管理模式; 智能防护与长效涂层技术, 填补了恶劣环境下的防护短板。更重要的是, 这些技术组合为海上同类工程提供了可借鉴的范式, 为后续海上石油平台设备安装的技术创新奠定基础, 助力石油行业在海洋开发领域实现更安全、高效的发展。

参考文献

- [1] 苑在胜. 自动化技术在石油机械设备安装中的应用前景[J]. 石化技术, 2025, 32(06): 339-341.
- [2] 寇泉. 石油机械设备安装施工常见问题及处置措施[J]. 设备管理与维修, 2020, (02): 65-66. DOI: 10.1662

1/j.cnki.issn1001-0599.2020.01D.34.

- [3] 黄东明. 石油化工机械设备安装施工常见问题及措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(02): 32-33.

- [4] 张浩楠. 石油机械设备安装施工常见问题及处置措施[J]. 中国设备工程, 2019, (24): 175-176.

作者简介: 高建超(1985.03—) 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 吉林四平, 学历: 本科, 职称: 无, 研究方向: 海洋石油平台设备安装与维修, 平台舾装通风安装工艺, 单位: 天津智能制造分公司。

尹龙(出生 1983.09—), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 河北省, 学历: 大专, 职称: 助理工程师, 研究方向: 仪表自动化控制系统设计与优化, 采油平台电仪安装技术设计及优化。单位: 天津智能制造分公司。

孙佳迎(1985.02.19—) 籍贯: 河北唐山, 学历: 本科, 职称: 无, 研究方向: 海洋石油平台设备安装与调试, 通风安装, 单位: 天津智能制造分公司。

于勇(1984.12—) 性别: 男, 民族: 汉族, 籍贯: 吉林省桦甸市, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化, 单位: 海洋石油工程股份有限公司。