

海洋平台工艺管线支吊架安装精度控制研究

齐一超 张志国 邹方祥 周迎安 阚洪望 (海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要: 为解决海洋平台工艺管线支吊架安装偏差易导致应力集中与疲劳损伤的问题, 本文对支吊架系统特征与精度检验方法进行研究, 提出“三维深化设计+高精度测量控制网+预制组对公差分配+运行工况复核调整”的全过程精度控制思路与关键技术路线, 以期为海洋平台工艺管线设计优化、现场施工管理和运行维护提供可操作的技术参考与决策依据服务工程。

关键词: 海洋平台; 工艺管线; 支吊架安装; 精度控制

中图分类号: TE952 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0124-03

Study on the Installation Precision Control of Offshore Platform Process Pipeline Supports and Hangers

Qi Yichao, Zhang Zhiguo, Zou Fangxiang, Zhou Ying'an, Kan Hongwang

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to solve the problem of stress concentration and fatigue damage caused by installation deviation of offshore platform process pipeline, this paper studies the characteristics and precision inspection methods of support and hanger system, and puts forward the whole process precision control idea and key technical route of “three-dimensional deepening design + high precision measurement control network + prefabricated group tolerance distribution + operation condition review adjustment”, so as to optimize the design of offshore platform process pipeline. On-site construction management and operation maintenance provide operable technical reference and decision-making basis for service engineering.

Key words: offshore platform process pipeline support hanger installation; precision control

海洋油气开发规模持续增大, 平台上部工艺管线高度集中, 支吊架承担荷载传递、位移约束与振动控制职能, 安装精度直接关系管线完整性和结构安全裕度。深水海况下风浪作用、温差及施工阶段结构变形叠加, 经验式安装难以满足三维坐标和标高公差要求, 局部误差累积易形成高应力区。针对安装精度开展研究, 对优化设计施工协同、降低失效风险具有重要意义。

1 海洋平台工艺管线支吊架系统特征及安装精度要求

1.1 海洋平台工艺管线系统特征分析

海洋平台工艺管线系统具有多层甲板空间交织、走向集中密集、工作压力与温度等级跨度较大等特征, 管线需在有限结构开孔与设备接口条件下实现工艺流程连续, 兼顾检修通道与消防疏散净空。海洋环境作用导致管线长期承受波浪、风载与平台整体振动, 引入周期性附加载荷与疲劳损伤风险^[1]。高盐高湿气氛增强外表面腐蚀与保温层下腐蚀趋势, 对管壁厚度余量与支吊架刚度配置提出更高要求, 整体系统呈现高耦合、高可靠性与精细安装控制需求。

1.2 支吊架安装精度指标体系

海洋平台工艺管线支吊架安装精度指标体系应围

绕空间坐标、姿态参数与受力状态构建, 通常包括平面位置偏差、标高偏差、坡度控制值、支架立柱垂直度以及横梁水平度等几何指标, 同时引入管线轴线偏移量、支承点间距偏差、恒力支吊架设定载荷误差、弹簧工作行程偏差、螺栓预紧力控制范围等受力相关指标。高温高压管线、关键安全屏障管系需设置更严安装公差, 为后续应力校核与振动分析提供可靠边界条件。

2 支吊架安装精度控制关键技术与实施方法

2.1 设计与深化阶段的精度控制

设计与深化阶段需在三维管系模型中引入精度约束条件, 通过 PDS、PDMS 或 Smart 3D 软件平台建立统一坐标体系, 控制支吊架节点坐标偏差不超过 $\pm 3\text{mm}$ 。支承点间距、弯管节距、补偿段长度须与应力分析模型一致, 关键管段长度偏差宜控制在 $L \times 0.1\%$ 且不大于 5mm 。支吊架布置密度按管径、介质密度、设计温度分级确定, 例如 DN300 保温输油管支承间距一般取 6.0m , 连续三跨差值不大于 0.5m 。深化设计中需对结构开孔中心、设备喷嘴方位角、平台基准网进行复核, 保证支吊架连接板预制孔位与结构节点偏差小于 $\pm 2\text{mm}$, 并通过预留 $10 \sim 20\text{mm}$ 竖向调节量、 $5 \sim 10\text{mm}$ 滑动余量, 为海上安装阶段提

供尺寸吸收能力。

2.2 测量控制与空间定位技术

测量控制与空间定位需依托高精度控制网与稳定基准点布设,上部组块通常采用三角网或闭合导线网,平面相对中误差宜优于 $1/40000$,高程中误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。全站仪角度精度不低于 $1''$,测距精度优于 $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$,对支吊架安装中心采用极坐标或空间前方交会方式放样,单点平面位置偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 。复杂区域可引入激光扫描仪,点云密度不低于 $100000\text{点}/\text{s}$,通过点云与三维模型配准,评估管线轴线与支架节点偏差分布。测量过程中需定期复测基准点位移,基准高程变化超过 $\pm 1.5\text{mm}$ 时应进行控制网平差与坐标更新,保证空间定位参数与数字化模型长期一致,为精度检验与后续应力复核提供可信依据。

2.3 预制与组对阶段的尺寸精度控制

预制与组对阶段的尺寸精度控制应以工艺管段展开长度、接口坐标以及支吊架连接面位置为核心参数,采用数控下料与专用胎架组合方式,将单根管段长度偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$,角度偏差不超过 0.3° 。厚度大于 16mm 的管件端面需进行车削加工,端面平面度控制在 0.5mm 以内,保证组对间隙稳定在 $2\sim 3\text{mm}$ 区间^[2]。组对胎架定位点数量不得少于3个,基准点间距宜控制在 $800\sim 1200\text{mm}$,通过刚性限位与千斤顶微调组合,使接口法兰面对中偏差不超过 1.5mm ,法兰面倾斜度小于 $1/500$ 。支吊架组件预拼装阶段应对立柱长度、横梁跨度及U形卡开口尺寸进行复测,结构件尺寸偏差控制在设计值的 $\pm 1\text{mm}$ 范围内,整体装配后采用钢卷尺、游标卡尺与角度尺联合检验,实测数据按批量抽检比例不低于 10% 进行统计分析,抽检合格率应稳定在 95% 以上。工艺管线支吊架预制与

组对阶段尺寸精度控制参数见表1。

2.4 安装施工阶段的过程精度控制

安装施工阶段的过程精度控制需围绕支吊架定位、焊接变形约束以及紧固件预紧力管理展开,支撑底板与结构钢梁焊接前应进行定位复测,坐标偏差超出 $\pm 3\text{mm}$ 时应通过打磨或加设过渡垫板方式修正。现场焊接顺序宜采用对称、多层多道工艺,单道焊缝线能量控制在 $8\sim 12\text{kJ}/\text{cm}$ 区间,以减小焊后收缩变形。高强螺栓连接采用扭剪型或摩擦型结构时,预紧力应达到 $0.7\sim 0.8\text{Re}$,拧紧顺序按对角分步加力方式执行,终拧扭矩偏差不超过标称值的 $\pm 10\%$ 。支吊架标高与坡度调整阶段需利用楔形垫片与可调螺杆组合,调整步距控制在 1mm 量级,标高最终偏差不得大于 $\pm 3\text{mm}$,管线坡度偏差应小于设计值的 15% 。过程监测中需对关键支撑点进行复测,测点数量不低于总数的 20% ,发现偏差超限须立即进行工序纠偏与记录归档,复测结果应形成曲线分布图用于评估整体施工稳定性。

2.5 运行工况视角下的安装精度复核与调整

运行工况视角下的安装精度复核与调整应依据冷态安装坐标、热态变形预测结果以及在线监测数据综合开展。高温管线在设计温度 $350\sim 420^\circ\text{C}$ 范围内,线膨胀系数取 $1.2\times 10^{-5}\sim 1.4\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,当固定支点间距达到 30m 时,单向热膨胀量可达 $126\sim 168\text{mm}$,需通过滑动支座与弹簧支吊架吸收位移。投产初期应在稳态运行 $24\sim 48\text{h}$ 内完成首轮复核,对支吊架行程指示值、恒力支架载荷设定刻度与管道实际挠度进行比对,相对设计目标偏离超过 10% 时应进行调整。位移监测可采用机械量规与激光位移传感器组合方案,测点间距不大于 10m ,采样周期宜取 $10\sim 30\text{s}$ ^[3]。长期运行阶段需对支点沉降、螺栓松弛与支

表1 工艺管线支吊架预制与组对阶段尺寸精度控制参数

控制项目	指标参数	说明/控制方法
单根管段长度偏差	$\pm 2\text{mm}$	数控下料,端部统一基准测量
管段折弯角度偏差	$\leq 0.3^\circ$	弯管机角度标定,工后全检
管口端面平面度	$\leq 0.5\text{mm}$	车削加工端面,采用塞尺与表尺复核
组对间隙	$2\sim 3\text{mm}$	采用定位垫片控制,焊前复检
组对胎架基准点间距	$800\sim 1200\text{mm}$	刚性胎架布点,不少于3个基准点
法兰面对中偏差	$\leq 1.5\text{mm}$	十字线与钢尺复测中心距
法兰面倾斜度	$\leq 1/500$	水准仪或角度尺检测倾斜量
结构件尺寸偏差	设计值 $\pm 1\text{mm}$	立柱长度、横梁跨度逐件测量
抽检比例	$\geq 10\%$	按批次随机抽检并记录实测数据
尺寸合格率目标	$\geq 95\%$	统计分析结果低于目标时启动纠偏措施

架构件疲劳裂纹进行周期检查,周期一般设定为6~12个月,通过对比历次测量曲线判断残余变形发展趋势并实施分级干预。

3 支吊架安装精度检验与评价体系构建

3.1 精度检验指标与验收标准

精度检验指标与验收标准应针对支吊架空间几何参数与受力状态双重属性构建,核心检验量包括支承点三维坐标、标高、相邻支点间距、支架构件垂直度与横梁水平度、管段坡度、与设备喷嘴配合间隙及恒力或弹簧支吊架工作行程。主干高温高压管线支承点三维坐标偏差限值宜取 $\pm 3\text{mm}$,一般工艺管线可放宽至 $\pm 5\text{mm}$;标高偏差建议主干线不超过 $\pm 4\text{mm}$,支线不超过 $\pm 6\text{mm}$ 。立柱垂直度常用 $H/1000$ 控制,横梁水平度控制在 $L/1500$ 以内;坡度偏差宜限制在设计值的20%以内。恒力支吊架设定载荷偏差一般控制在额定载荷的 $\pm 5\%$,弹簧压缩量偏差不宜超出设计行程的 $\pm 10\%$ 。抽查数量宜占支吊架总数的15%以上,主干线与安全相关管系应采用逐点检验方式,最终按单点是否满足限值、检验批合格率以及关键管系全面符合率三层标准进行综合验收。

3.2 检测方法与检验程序

检测方法与检验程序应根据精度等级与施工阶段差异进行组合配置。几何参数现场复核以全站仪、电子水准仪和精密钢尺为主,必要时辅以三维激光扫描。全站仪角秒精度可选1"级,测距相对精度优于 $1/40000$;水准测量闭合差控制在 $\pm 3\sqrt{k}\text{mm}$ 以内,k为测段公里数^[4]。检验程序一般分为基准复核、支架初测、调整复测与终检四个阶段:基准复核阶段重点确认控制点坐标偏差未超出 $\pm 2\text{mm}$;初测阶段对全部固定支架和恒力支吊架进行几何测量,检测点密度不低于每10m设置1点;复测阶段依据偏差方向进行结构调整,再次量测确认偏差降至限值内;终检阶段采用抽检与重点区域全检相结合方式,抽测支架数量占总数20%~30%。对于复杂区域,可利用激光扫描获取点云,点间距控制在5~10mm范围,通过与三维设计模型对比分析支架位置与管线轴线关系,使检验结果具备可视化特征与量化依据。

3.3 精度数据分析与评价方法

精度数据分析以结构化数据库为基础,采集支吊架三维坐标、标高偏差、跨距偏差、坡度偏差、支承反力等参数,按公称直径、管系等级、区域分区建立分组样本。单点综合偏差信息用 $D = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}$ 表征,偏差分级阈值可取3mm、6mm、10mm,用于划分正常、关注与超限区间。采用正态分布假设与 3σ 准则核算总体合格率,关键管系安装偏

差合格率目标值不低于98%,一般管系不低于95%。工序能力指数 C_p 、 C_{pk} 用于评价施工过程稳定性,控制指标宜达到1.33以上,重点区域力求提升至1.67。通过多元回归与主成分分析识别对偏差影响最显著因子,例如构件刚度EI、焊接线能量、测距长度L等,为后续工艺修正与测量网优化提供量化依据。

3.4 精度控制的闭环管理与持续改进机制

精度控制的闭环管理以“计划—实施—检查—处置”循环模式运行,将设计、公差分配、预制、安装、检测各阶段数据信息纳入统一平台,形成可追溯台账。关键支吊架构件需记录设计坐标、实测偏差、调整量、复测结果四类字段,数据完整率目标值不低于98%。按月统计安装偏差超限率、返工率、测量复测率等指标,主干管系偏差超限率控制在2%以下,返工率控制在1%以下^[5]。设置预警阈值,当任一工序平均偏差接近控制限70%时启动工艺评审与作业指导书修订,同时对相关班组开展针对性培训。每季度组织一次精度专题评审会议,至少覆盖在建项目80%以上,通过对比不同项目精度合格率与 C_p 、 C_{pk} 分布特征,筛选表现优良工法与测量方案,形成标准化指引,使合格率从初期约93%提升至长期稳定值98%以上,并以管理评审方式固化成果。

4 结语

总而言之,海洋平台工艺管线支吊架安装精度控制直接制约管道强度、设备安全和上部结构受力状态,深水环境、高温高压及波浪振动叠加,毫米级偏差累积即可诱发应力集中与疲劳损伤。三维深化设计、测量控制网、预制组对管理、现场调整及精度评价协同构成保障链条,为运行安全提供边界条件和量化依据。未来需在数字化测控、在线监测和智能决策平台应用,使精度控制水平契合海洋工程服役环境。

参考文献:

- [1] 唐玮,田雨露,刘九竹.石化装置管道支吊架的设计对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(10):138-140.
- [2] 尉婷,吴冰冰,龙万江,等.支吊架结构输油管道应变仿真及光纤布里渊散射实验研究[J].光通信技术,2022,46(06):73-76.
- [3] 张蕾.石油化工管道应力设计研究[J].化工管理,2021(30):200-202.
- [4] 刘敬乐,司爱俊.支吊架在石油化工管道中的合理设计分析[J].当代化工研究,2021(01):25-26.
- [5] 韩羽.海洋石油平台工艺管线防腐技术的发展[J].石化技术,2022,29(02):100-101.