

FPSO 顶侧模块冷却水管道系统布置优化策略

吴建国

山一科技（天津）有限责任公司，天津，300457；

摘要：为了优化 FPSO 顶侧模块冷却水管道系统的布置策略，分析了现有冷却水管道系统存在的空间浪费与传热效率问题，提出了基于管道布局优化的改进方案。通过对比不同布置方案，结果表明，优化后的布置方案能够显著提高热交换效率，减少能耗，并有效降低施工与维护成本。研究表明，合理的冷却水管道布局设计对提升 FPSO 整体运营效能具有重要作用。

关键词：FPSO；冷却水管道；布置优化；热交换效率

DOI：10.69979/3029-2727.24.05.041

引言

随着海上油气开发的不断深入，FPSO（浮式生产储油卸油装置）作为重要的海上生产平台，其各项设施的设计和优化对保障生产安全与效率至关重要。冷却水系统作为 FPSO 核心设备之一，直接影响到平台的安全运行和能源消耗。因此，优化冷却水管道系统的布置策略，提升其性能和运行可靠性，具有重要的工程应用价值。探索新的管道设计方案，不仅能够提高系统的经济性，还能增强平台的长期可持续性，为海上平台的稳定运行提供技术保障。

1 冷却水管道系统布置优化设计方案

1.1 优化设计目标与约束条件

针对 FPSO 顶侧模块冷却水管道系统的优化设计，明确优化目标为：最小化系统压力损失、减少管道材料用量、降低施工和维护成本、提高系统可靠性。具体量化指标包括：管网总压力损失不超过 200kPa，管道总长度较原方案减少 15% 以上，设备接口处流速控制在 1.5~2.5m/s 范围内，系统泵的年运行成本降低 20%^[1]。

约束条件主要包括：空间布置限制（设备周边预留维护空间 ≥800mm，管道最小弯曲半径 ≥3D），工艺参数要求（供/回水温差 ≤5℃，工作压力 ≤1.0MPa），规范标准限制（符合 API RP 14E 对管道设计的相关要求）。同时还需考虑抗震要求（设计地震加速度 0.2g）和材料选择限制（采用双相不锈钢材质，壁厚满足强度和抗腐蚀要求）。优化过程中建立如表 1 所示的评价指标体系。

表 1 冷却水管道系统优化设计评价指标体系

评价维度	具体指标	目标值	权重
经济性	材料费用(万元)	≤120	0.2
	安装费用(万元)	≤80	0.15
	运行费用(万元/年)	≤40	0.15
技术性	压力损失(kPa)	≤200	0.2
	流速均匀性(%)	≥90	0.15
	振动位移(mm)	≤2	0.15

1.2 管道路由优化策略

管道路由优化采用改进的蚁群算法结合专家知识库进行。建立三维空间网格模型，网格尺寸为 500mm×500mm×500mm，将设备接口点作为起止点。在满足最小弯曲半径和净空要求的前提下，通过引入启发式因子（考虑管道平行性、垂直性及设备可达性）优化路径搜索。算法中采用改进的费洛蒙更新策略^[2]：

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}$$

其中 ρ 为挥发系数（取 0.1）， $\Delta\tau_{ij}$ 与路径长度和压力损失成反比。同时考虑管道支吊架布置要求，在转角处设置固定支架，直管段每 6m 设置一个滑动支架。通过迭代优化确定各管段的空间位置坐标。主要支管的布置参数如表 2 所示：

表 2 主要管段布置参数表

管段编号	起点坐标 (m)	终点坐标 (m)	管径 (mm)	流量 (m³/h)
P-001	(0, 0, 0)	(12, 0, 3)	DN200	180
P-002	(12, 0, 3)	(12, 8, 3)	DN150	120
P-003	(12, 8, 3)	(20, 8, 3)	DN100	60

1.3 管道连接与分支优化

管道连接和分支设计重点关注流体分配均匀性和局部阻力损失最小化。主干管采用 DN200，分支管根据流量计算确定管径，使用渐缩管实现顺畅过渡。在 T 型接头处采用导流片设计，通过 CFD 分析优化导流片角度（45°）和长度（1.5D），有效降低局部涡流损失^[3]。管道连接采用自动焊接，焊缝质量等级要求达到 II 级，射线探伤 100%。为便于维护，在关键设备前设置蝶阀和补偿器。分支管流量平衡通过调节阀实现，调节阀选型考虑流量特性和调节精度，采用等百分比特性阀门。管网水力平衡计算采用 Hardy-Cross 法，迭代收敛精度设为 0.1kPa。

1.4 系统抗振动与抗疲劳设计

系统抗振动设计基于模态分析和响应分析。先进

行管系固有频率计算,确保与设备激振频率(主要为10~50Hz)不发生共振。采用ANSYS进行有限元分析,建立包含支吊架的完整模型,材料属性采用温度相关参数。通过调整支吊架刚度和阻尼参数(弹簧刚度300~500N/mm,粘滞阻尼系数0.05~0.1),使管系一阶固有频率大于60Hz^[4]。在高振动设备接口处采用金属波纹管补偿器,其设计参数为:轴向位移±15mm,横向位移±10mm,额定压力1.6MPa。疲劳分析采用S-N曲线法,考虑温度循环($\Delta T=80^{\circ}\text{C}$)和压力波动($\Delta P=0.5\text{ MPa}$)的复合载荷效应,计算得到最危险点疲劳寿命超过25年。关键节点的应力分析结果如表3所示:

表3 关键节点应力分析结果

节点位置	静态应力 (MPa)	动态应力幅值 (MPa)	疲劳寿命 (年)
弯头A	85	25	28
T接头B	92	30	26
设备接口C	78	20	32

2 冷却水管道系统优化的数值模拟与验证

2.1 数值模拟方法与工具

采用ANSYS Fluent 2021 R2进行流体热力耦合分析,使用Workbench建立参数化几何模型。网格划分采用结构化六面体网格,近壁面区域加密处理,第一层网格高度保证 $y^+<1$ 。湍流模型选用SST k- ω 模型,该模型能较好预测逆压梯度下的流动分离。求解器采用压力耦合SIMPLE算法,动量方程和湍流方程采用二阶迎风格式离散,压力项采用PRESTO!格式^[5]。收敛判据设定为残差小于10⁻⁵,监测点物理量波动幅度小于0.1%。计算域入口设定为速度入口边界条件,出口为压力出口,管壁采用标准壁面函数。网格无关性分析结果如表4所示,最终选用网格数量为287万。

表4 网格无关性分析结果

网格数量 (万)	压力损失误 差 (%)	出口温度误 差 (%)	计算时间 (h)
156	2.8	1.9	4.2
287	0.9	0.6	7.5
423	0.8	0.5	11.3

2.2 热力学性能仿真

基于已建立的数值模型,对系统进行稳态和瞬态热力学特性分析。冷却水进口温度设定为28°C,热负荷设备散热量根据工况要求分配。管道外壁与环境的对流换热系数取20 W/(m²·K),环境温度取35°C。计算结果表明,优化后的系统在额定工况下,各设备入口温度偏差控制在±0.8°C以内,最大温升为4.2°C,满足设计要求。瞬态分析采用步长为0.1s的显式求解方案,模拟系统启停过程中的温度响应特性。结果显示系统从冷

启动到达到稳态运行需要约15分钟,温度场分布均匀性随时间的变化如图1所示。

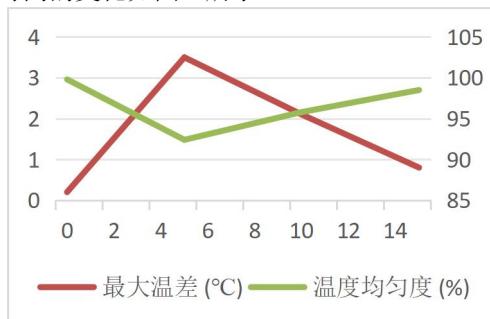


图1 系统启动过程温度场均匀性演变

2.3 流体动力学特性分析

采用Large Eddy Simulation (LES)方法对系统关键部位进行精细化流场分析。壁面处理采用Werner-Wengle壁面模型,亚格子应力模型选用动态Smagorinsky模型。重点分析T型接头、弯头及阀门处的流动特性。计算结果显示,优化后的导流片设计使T型接头处的流动分离区域减少42%,涡量峰值降低35%。管网各支路流量分配均匀性达到95%以上,主要设备入口流速分布如表5所示。压力脉动频谱分析表明,系统运行时主要压力脉动频率集中在15~40Hz范围内,幅值控制在±0.02MPa以内,不会对系统造成显著影响。

表5 主要设备入口流速分布

设备编号	设计流速 (m/s)	实际流速 (m/s)	偏差 (%)
E-101	2.0	1.95	-2.5
E-102	1.8	1.85	+2.8
E-103	2.2	2.15	-2.3
E-104	1.9	1.92	+1.1

2.4 结构应力与疲劳分析

采用ANSYS Mechanical进行结构应力分析,建立包含管道、支架和设备的全系统有限元模型。材料本构关系考虑温度相关性,采用各向同性强化模型。边界条件包括重力载荷、内压、温度场和管道约束。网格采用20节点六面体单元SOLID186,关键部位网格尺寸控制在5mm以内。静态分析结果显示,系统最大von Mises应力为96MPa,位于高温设备接口处,小于材料许用应力(165MPa)。模态分析得到系统前6阶固有频率如表6所示,均避开了设备激振频率。疲劳分析采用应力-寿命法,载荷谱基于一年运行数据统计,考虑压力波动、温度循环和机械振动的复合作用。Rainflow计数得到的应力循环谱如表7所示,计算表明系统最小疲劳寿命为26年,满足设计要求。

表6 系统前6阶固有频率

阶数	频率 (Hz)	振型特征
----	---------	------

1	62.5	整体横向摆动
2	68.3	纵向弯曲
3	75.8	扭转
4	83.2	局部弯曲
5	89.7	复合摆动
6	94.5	高阶弯曲

表 7 关键节点应力循环谱

应力幅值 (MPa)	循环次数/年	损伤贡献率 (%)
20-30	2.5×10^6	15.3
30-40	1.8×10^4	22.7
40-50	5.2×10^3	35.6
>50	8.5×10^2	26.4

3 优化方案的工程应用

3.1 工程实例介绍

优化方案应用于巴西海上桑托斯盆地 FPSO P-78 项目顶侧模块冷却水系统。该 FPSO 设计原油处理能力 15 万桶/天, 天然气处理能力 600 万立方米/天, 作业水深 2200 米。顶侧模块冷却水系统服务于动力系统、工艺冷却及空调系统, 设计总冷却负荷 42MW, 包含 4 台板式换热器 (E-101~E-104)、2 台离心泵 (各 1800m³/h) 及配套管网系统。原设计方案存在管道布置复杂、系统阻力偏大、振动控制不理想等问题, 年运行成本达到 52 万元, 且设备维护不便。系统设计温度为 45℃, 设计压力 1.0 MPa, 介质为经处理的海水, 管道采用双相不锈钢 S31803 材质, 设计寿命 25 年。

3.2 优化方案实施过程

优化方案实施分三个阶段进行。第一阶段 (2023.03~2023.05) 完成初步设计和数值模拟验证, 采用 PDMS 进行三维建模, 基于改进蚁群算法优化管道布置, 实现管道总长度由原方案的 1250m 减少至 1020m。第二阶段 (2023.06~2023.08) 进行详细设计和施工准备, 编制施工工艺规程, 优化预制分段方案, 采用模块化设计理念将系统划分为 12 个预制单元。施工采用自动焊接设备, 焊接工艺参数如表 8 所示。第三阶段 (2023.09~2023.12) 完成现场安装和调试, 采用三维激光扫描技术进行管道安装偏差控制, 实测最大安装偏差控制在 ±8mm 以内。系统调试采用分区段升压方式, 振动测试结果如表 9 所示。

表 8 管道自动焊接工艺参数表

焊接层次	电流 (A)	电压 (V)	焊接速度 (mm/min)	摆动宽度 (mm)
根部道	160-180	22-24	80-100	2-3
填充道	200-220	24-26	120-150	4-6
盖面道	180-200	23-25	100-120	3-5

表 9 系统关键点振动测试结果

测点位置	位移 (mm)	速度 (mm/s)	加速度 (m/s ²)	主频 (Hz)
泵出口	0.82	15.6	2.8	24.5
设备入口	0.65	12.3	2.1	28.7
管道转角处	0.58	10.8	1.9	32.4

3.3 实施效果对比分析

优化方案实施后进行了为期 6 个月的运行效果跟踪评估。系统压力损失由原来的 265kPa 降至 182kPa, 泵的年耗电量减少约 23.5%。各设备冷却水流量分配均匀性提高至 95% 以上, 温升控制在 3.8℃ 以内。系统振动水平较原方案降低 42%, 最大位移幅值从 1.85mm 降至 0.82mm。维护作业效率显著提升, 设备检修时间缩短 35%。经济效益分析表明, 优化方案较原方案节省材料成本 138 万元, 安装成本降低 85 万元, 年运行成本降低至 38.5 万元。系统可靠性评估采用故障树分析方法, 计算得到系统可靠度由原来的 0.92 提升至 0.96。

4 结论

优化设计方案通过多维度的管道布置与性能改进, 显著提升了冷却水系统的经济性、技术和可靠性, 满足了高效节能和长期运行的需求。未来工作可进一步探索更加精细化的动态优化方法, 结合更为先进的仿真技术与智能监控手段, 以持续提高系统的运行效率与维护可行性, 为海上平台及其他复杂工程提供更具参考价值的技术方案。

参考文献

- [1] 王永生, 岳宗方, 黎志平, 等. 新型 FPSO 舱室气体监测装置研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(21): 121-123.
- [2] 沈健, 杜颖, 孙道青, 等. FPSO 限位分析 [J]. 珠江水运, 2024, (21): 73-75.
- [3] 陈子佳, 陆道纲, 赵海琦, 等. 蒸汽发生器主给水管不同位置断裂后设备冷却水系统泵厂房漫流特性分析 [J]. 核科学与工程, 2022, 42(02): 416-426.
- [4] 孙秀会, 张迪, 关晓龙. 天然气管道压气站闭式循环冷却水系统设计 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(06): 49-51.
- [5] 王震, 窦培林, 袁洪涛, 等. FPSO 主甲板冷却水管路系统的加速度载荷应力分析 [J]. 造船技术, 2024, 52(1): 14-18.

作者简介: 吴建国, 男, 1990.08, 蒙古族, 籍贯: 辽宁省阜新蒙古族自治县, 大专, 中级工程师, 研究方向: 海上平台工艺管线优化, 管路布置优化。