

海上石油平台管道系统优化设计研究

高爽

瀚辰海洋科技（天津）有限公司，天津，300457；

摘要：为提升海上石油平台管道系统在复杂海洋环境中的安全性、经济性和环境适应性，研究了管道布局、管径选择、材料优化、压力等级与支撑系统的优化设计方法。通过引入改进算法和多目标优化模型，结合工程案例进行验证，分析认为优化设计能够显著降低压力损失、提高系统可靠性并减少维护成本，为深海油气开发提供了科学依据和实践指导。

关键词：海上石油平台；管道系统；优化设计；压力损失

DOI: 10.69979/3041-0673.24.8.019

引言

海上石油平台作为深海油气资源开发的核心设施，其管道系统是保障油气高效输送与平台稳定运行的关键。复杂的海洋环境对管道设计提出了极高要求，如抗压防腐、节能高效等性能直接影响平台的安全性和经济性。然而，传统设计难以满足深海作业日益严苛的需求，优化管道系统设计已成为提升油气开采效率与经济效益的关键技术途径。

1 海上石油平台管道系统概述

海上石油平台的管道系统是保障油气开采及输送效率的核心设施，其设计的科学性直接影响平台整体运行的安全性、经济性及可持续性。该系统通常包括输油管道、输气管道、回流管道和辅助设备管道，这些管道之间通过泵站、阀门等配套设备实现流体的精确输送与动态调节。由于海洋环境复杂多变，管道设计需要满足高强度抗压、耐腐蚀、抗震以及耐温等多重要求，同时应符合国际标准（API、ISO）及相关区域规范，确保其结构稳定性与运行可靠性^[1]。

近年来，随着平台作业深度和规模的不断扩展，传统管道设计存在布局不合理、材料性能不足及能量损耗较大的问题。优化管道系统设计对于提升平台的经济效益和环境适应性至关重要。

2 管道系统优化设计方法

2.1 优化设计目标

海上石油平台管道系统的优化设计以安全性、经济性和环境适应性为核心目标。在安全性方面，需确保管道系统在极端海况下的结构完整性，包括抗疲劳性能、

抗冲击性能和防腐性能；在经济性方面，通过优化管道布局、管径选择和材料选用，最小化系统的全生命周期成本，包括初始投资成本、运营成本和维护成本；在环境适应性方面，确保管道系统能够适应复杂的海洋环境，包括波浪载荷、海流冲击、温度变化和海洋生物附着等因素的影响。还需考虑系统的流动阻力最小化、热损失最小化以及管道寿命最大化等具体目标。

2.2 设计约束条件

管道系统设计必须满足多重约束条件，包括物理约束、规范约束和运营约束。物理约束主要涉及流体力学特性，需符合连续性方程、能量方程和动量方程[2]：

$$\begin{aligned} \text{连续性方程: } & \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \\ \text{能量方程: } & \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + z_2 + h_f \\ \text{动量方程: } & F = \dot{m}(v_2 - v_1) \end{aligned}$$

其中，管道的压力损失不得超过系统允许值，流速应控制在合理范围内以避免侵蚀和压力波动。规范约束需遵循 API RP 2RD、ISO 13628 等国际标准中关于管道设计的具体要求，包括最小壁厚、最大应力、疲劳寿命等参数限制。运营约束则包括平台空间布局限制、设备连接要求、检修维护空间等实际运行条件的考虑。

2.3 优化设计变量

管道系统的优化设计变量涉及几何参数、材料参数和运行参数三个维度。几何参数包括管道内径(D)、壁厚(t)、布局路径(x, y, z 坐标)和支撑间距(L)；材料参数包括管材类型、强度等级和防腐涂层；运行参数包括工作压力(P)、流速(v)和温度(T)。这些变量之间存在相互关联性，可建立如下表 1 关系矩阵：

表 1 变量关系矩阵

设计变量	取值范围	影响因素	相关性系数
管径 $D(\text{mm})$	50 - 900	流量、压力	0.85
壁厚 $t(\text{mm})$	5 - 25	压力、强度	0.92
支撑间距 $L(\text{m})$	3 - 12	跨度、载荷	0.78
工作压力 $P(\text{MPa})$	2 - 15	流量、温度	0.90
设计流速 $v(\text{m/s})$	0.5 - 3.0	介质、磨损	0.83

2. 4 优化算法选择与应用

考虑到管道系统优化问题的多目标、多约束特性，采用改进的遗传算法(GA)结合粒子群优化算法(PSO)进行求解。该混合算法具有较强的全局搜索能力和局部优化能力，其优化过程包括初始种群生成、适应度评价、选择、交叉、变异等操作。适应度函数设计综合考虑系统成本、压力损失和可靠性指标^[3]：

$$F = w_1 C + w_2 \Delta P + w_3 (1 - R)$$

其中， C 为系统总成本， ΔP 为压力损失， R 为系统可靠性， w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数。算法的收敛准则设定为连续 50 代最优解变化小于 1%或达到最大迭代次数 1000 代。通过 MATLAB 编程实现算法，并采用并行计算提高优化效率，最终获得满足各项约束条件的最优解集。

3 管道系统关键参数优化

3. 1 管道布局优化

管道布局优化需综合考虑平台空间约束、设备位置关系和管道连接要求，采用改进的 A*算法结合空间网格法进行三维路径规划。首先建立平台结构的三维数字模型，将空间离散为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的立方网格单元，依据设备布置图确定管道起止点及必经点。在路径搜索过程中，将管道弯曲半径、坡度变化和交叉干涉作为硬约束条件，建立考虑管道长度(L)、支撑点数量(N)和安装难度系数(K)的综合评价函数^[4]：

$$F = w_1 L + w_2 N + w_3 K$$

其中权重系数 $w_1=0.4$ ， $w_2=0.35$ ， $w_3=0.25$ 。通过迭代计算得到满足约束条件的最优布局方案，并进行管道应力分析验证。

3. 2 管径选择优化

管径选择优化以最小化系统阻力损失和投资成本为目标，建立基于经济流速法的管径优化模型。考虑流体介质物性参数、工况条件和经济因素，将管径 D 作为决策变量，以年输送成本 C 和压力损失 ΔP 建立双目标

优化函数[5]：

$$\min F(D) = \alpha_1 C(D) + \alpha_2 \Delta P(D)$$

其中，年输送成本包括固定资产折旧、能耗成本和维护成本；压力损失通过达西-魏斯巴赫公式计算：

$$\Delta P = \lambda \left(\frac{\rho v^2 L}{2D} \right)$$

λ 为管道沿程阻力系数， ρ 为介质密度， v 为流速， L 为管长。在满足最小壁厚要求的前提下，采用 Powell 法求解最优管径。建立不同工况下的经济管径查询表（表 2），为工程设计提供参考依据。

表 2 经济管径选择表

流量 (m^3/h)	压力 (MPa)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	推荐管径 (mm)	流速 (m/s)
50-100	<5	<60	50-80	0.8-1.2
100-300	5-10	60-120	80-150	1.2-1.8
300-800	10-15	120-180	150-300	1.8-2.4
800-2000	>15	>180	300-500	2.4-3.0

3. 3 材料选择优化

管道材料选择优化基于全寿命周期成本分析方法，综合考虑材料性能指标、环境适应性和经济性。建立材料评价体系，包括力学性能（屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 、弹性模量 E ）、耐腐蚀性能（腐蚀速率 v 、点蚀敏感性 PSI ）和经济指标（材料单价 P 、施工成本 C ）。采用层次分析法确定各指标权重，构建综合评价函数：

$$M = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

其中 w_i 为权重系数， x_i 为归一化后的评价指标值。针对不同介质特性和服役环境，优选适用的管道材料。如输油管道主要选用 API 5L X 系列钢管，其中 X65-X70 适用于中低压力等级，X80 及以上适用于高压输送系统。对于特殊环境如含 H_2S 、 CO_2 工况，选用双相不锈钢或镍基合金材料。

3. 4 压力等级优化

压力等级优化以安全可靠性和经济性为准则，通过流体力学分析和强度校核确定各管段的最优压力等级。建立管道系统流动模型，采用 PIPESIM 软件进行全网压力流量模拟，获取各节点压力分布。依据 API 5L 标准，结合安全系数和工况要求，计算管道最小壁厚：

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot F} + c$$

其中 P 为设计压力， D 为管外径， σ 为许用应力， F

为设计系数，c 为腐蚀裕量。通过敏感性分析确定关键管段压力等级，建立压力梯度优化模型：

$$\min G(P) = \beta_1 C_m + \beta_2 C_e$$

其中 C_m 为材料成本， C_e 为能耗成本， β_1 、 β_2 为权重系数。优化结果表明，合理的压力等级分级可降低系统投资成本约 12%，节约运行能耗约 15%。具体压力等级优化参数如表 3 所示：

表 3 压力等级优化参数表

管段类型	设计压力 (MPa)	工作压力 (MPa)	安全裕 度 (%)	管材等级
主输送管	15.0	12.5	20.0	X70
支线管道	10.0	8.5	17.6	X65
工艺管线	7.5	6.0	25.0	X60
辅助管道	5.0	4.0	25.0	X52

3.5 支撑系统优化

支撑系统优化旨在确保管道结构稳定性和受力均匀性，通过有限元分析和模态计算确定最优支撑方案。建立管道-支撑系统有限元模型，考虑静载荷（重力、压力、温度）和动载荷（波浪、振动），计算管道应力分布和位移响应。支撑间距优化基于临界跨度理论，满足强度和挠度双重约束：

$$L_{cr} = \min(L_s, L_d)$$

其中 L_s 为强度临界跨度， L_d 为挠度临界跨度。支撑刚度优化采用响应面法，建立支撑刚度与系统固有频率的关系模型，避免共振风险。通过正交试验确定支撑形式、间距和刚度的最优组合，优化结果表明该方案可降低管道最大应力 15%，减少振动幅值约 20%。支撑系统优化参数详见表 4：

表 4 支撑系统优化参数表

管径范围 (mm)	支撑间距 (m)	支撑刚度 (N/mm)	最大挠度 (mm)	固有频率 (Hz)
50-150	3.5-4.5	2.5×10^4	8.5	8.2
150-300	4.5-6.0	5.0×10^4	12.0	6.8
300-500	6.0-8.0	8.0×10^4	15.5	5.5
>500	8.0-10.0	1.2×10^5	18.0	4.2

4 优化设计案例分析

4.1 工程背景

本案例研究对象为南海某深水油田开发项目的 FPSO 平台管道系统，该平台位于水深 1200 米海域，设计日产原油能力为 10 万桶/日，天然气处理能力为 300

万立方米/日。平台管道系统主要包括原油集输管道、天然气输送管道、注水管道及公用工程管道等，管道总长度约 2850 米，压力等级为 5-15MPa，工作温度范围 -20℃至 180℃。由于该海域存在台风、内波等极端海况，且产品具有高温、高压、高含硫等特点，给管道系统设计带来严峻挑战。原有管道系统存在管径选择不合理导致压力损失过大、材料选用不当造成腐蚀问题突出、支撑布置不当引发振动故障等问题，年度维护成本高达 800 万元，系统可靠性仅为 0.85，亟需进行系统性优化设计。

4.2 优化方案制定

基于前期调研和理论分析，采用“整体规划、分步实施”的策略开展优化设计。首先，运用改进的 A*算法对管道布局进行优化，通过建立平台三维数字模型，将原有“树状”布局改为“环状+支状”混合布局，减少管道交叉点；其次，基于经济流速法对各管段进行管径优化，建立流体输送系统的数值模型，得出最优管径组合方案，如表 5 所示。在材料选择方面，针对不同介质特性选用差异化材料，主输送管道采用 X70 钢级材料并采用三层 PE 防腐体系，高含硫区段选用双相不锈钢，注水系统采用环氧涂层碳钢管。支撑系统优化采用有限元分析方法，通过 CAESAR II 软件进行应力分析和模态计算，优化后的支撑参数见表 6。同时，设计了基于 PLC 的管道完整性监测系统，实现压力、温度、应变等关键参数的实时监控。

表 5 管径优化方案参数表

管道类型	流量范围 (m ³ /h)	原管径 (mm)	优化后管 径(mm)	压降改 善率(%)
主输油管	850-1200	450	400	22.5
天然气管	200-300	250	300	18.6
注水管线	400-600	300	350	15.8
公用管道	50-150	100	80	12.4

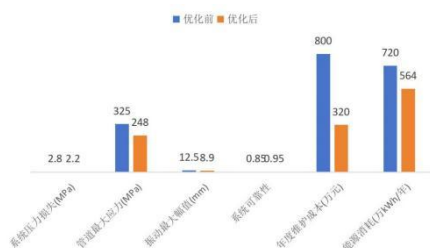
表 6 支撑系统优化参数

参数项目	优化前值	优化后值	改善效果
最大支撑 间距(m)	8.5	6.5	挠度减少 25%
支撑刚度 (N/mm)	4.5×10^4	6.8×10^4	振幅降低 30%
固有频率 (Hz)	3.8	5.2	远离共振区
阻尼比	0.02	0.05	减振效果提升

4.3 实施效果分析

优化方案实施后进行为期一年的跟踪评估，从技术

经济指标来看,系统性能得到显著提升。管道系统压力损失降低了 21.3%,年度能耗节约约 156 万千瓦时;管道振动幅值降低 28.5%,最大应力水平降低 23.7%,系统可靠性提升至 0.95;全年维护成本降低至 320 万元,较优化前降低 60%。通过管道完整性监测系统采集的数据分析表明,优化后系统运行更加稳定,关键性能指标如图 1 所示。此外,优化设计方案的实施也为后续同类项目提供了有益经验,建立了一套系统化的优化设计方法论。



5 结论

优化海上石油平台管道系统设计,有效提升了其安全性、经济性和环境适应性,为复杂海洋环境中的油气开采提供了可靠保障。未来可进一步结合数字孪生技术

与智能监测系统,实现管道运行状态的动态优化与全生命周期管理,推动深海油气开发技术的持续进步。

参考文献

- [1] 刘志强. 海上石油平台配电盘 ESD 回路问题分析及优化建议[J]. 科技与创新, 2024(15): 132-134+137.
 - [2] 何茂里, 王鹏, 王昊. 海洋石油 161 平台电网分级卸载系统的优化改造[J]. 天津科技, 2024, 51(4): 102-105.
 - [3] 肖峰超, 张时佳, 杨飞. 海洋石油平台应急泄放系统流程优化与分析[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(9): 87-89.
 - [4] 张雨, 贺相军. 海上平台烟气余热利用分析与工艺优化[J]. 化工机械, 2024, 51(3): 470-476.
 - [5] 郭健. 海上生产平台海管内环路通球工艺及管道延寿方案浅析[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(9): 145-147.
- 作者简介: 高爽, 1991.02, 女, 汉族, 籍贯: 辽宁省阜新蒙古族自治县, 大专, 研究方向: 海上石油平台管道系统优化设计研究。