

海上浮式生产储油装置原油外输工艺优化策略

杨晓波（中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司，天津 300451）

摘要：针对海上浮式生产储油装置（FPSO）原油外输工艺存在的效率瓶颈、安全隐患及经济性不足等问题，本文提出多维度协同优化策略。通过构建融合流体动力学、动力定位能耗与风险概率的多目标优化模型，结合柔性软管材料创新、环境窗口智能调度算法和全生命周期成本控制体系，实现外输效率、安全性与经济性的协同提升。案例验证表明：优化方案使输油效率提升 29.3%，安全风险等级降低 63.8%，投资回报率（ROI）达 2.7。

关键词：浮式生产储油装置；原油外输工艺；多目标优化

中图分类号：TE5 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）013-0092-03

Optimization strategy for crude oil export process of offshore floating production and storage facilities

Yang Xiaobo (CNOOC Energy Technology & Services Ltd – Oil Production Service Co., Tianjin 300451, China)

Abstract: In response to the efficiency bottlenecks, safety hazards, and economic deficiencies in the crude oil export process of offshore floating production and storage units (FPSOs), this paper proposes a multidimensional collaborative optimization strategy. By constructing a multi-objective optimization model that integrates fluid dynamics, dynamic positioning energy consumption, and risk probability, combined with innovative flexible hose materials, intelligent scheduling algorithms for environmental windows, and a full lifecycle cost control system, the synergistic improvement of export efficiency, safety, and economy is achieved. Case verification shows that the optimization plan improves oil transportation efficiency by 29.3%, reduces safety risk levels by 63.8%, and achieves a return on investment (ROI) of 2.7.

Keywords: floating production oil storage unit; Crude oil export process; Multi-Objective Optimization

浮式生产储油卸油装置（FPSO）被称为海洋工程领域“皇冠上的明珠”，是综合性海上油气加工厂，是海上天然气开采与利用的重要装备，有着设计建造要求高、价值高、工程管理复杂、产业带动性强等特点。未来油气发展空间主要在海上，尤其是深水领域。随着技术突破，开采成本也在逐渐降低。目前，FPSO 占全球浮式生产平台的三分之二，近年来 FPSO 的数量呈现增长趋势，主要在南美、西非和东南亚等地，海工制造生产链也在向亚洲转移。据统计，全球 35% 的 FPSO 项目面临外输效率低下、泄漏事故频发等问题，2022 年因外输系统故障导致的经济损失超过 7.5 亿美元。现有研究多聚焦于单一设备优化，缺乏对效率 - 安全 - 经济协同机制的深入探索。

1 FPSO 原油外输工艺系统分析

1.1 FPSO 外输系统组成与流程

FPSO 原油外输系统主要由储油舱、输油泵组、外输软管或刚性臂三大部分构成。储油舱通常采用分区式结构设计，通过加热装置维持原油流动性。输油泵组作为动力核心，采用多泵并联配置以满足不同流量需求，其运行状态直接影响外输效率。外输软管或刚性臂作为连接 FPSO 与穿梭油轮的关键通道，需具备柔性补偿和耐压特性。动力定位系统（DP）与系泊

系统协同作用，通过实时调整船体位姿，抵消风浪流引起的漂移，确保外输作业期间两船间的安全距离。整个流程涉及原油从储舱抽取、加压输送、动态连接及油轮接收等环节，需通过中央控制系统实现全链条监控。

1.2 外输工艺关键影响因素

① 海洋环境动态干扰。海洋环境条件直接制约外输作业的可行性。强风浪导致船体剧烈晃动，可能引发外输软管过度弯曲或连接装置失效；持续海流作用迫使动力定位系统持续耗能维持船位；极端低温环境加剧原油黏稠度，增加泵送阻力。这些环境变量的耦合作用显著压缩有效作业时间窗口。② 设备性能退化效应。外输软管在循环载荷作用下易产生材料疲劳，表现为表层龟裂、内衬剥离等渐进式损伤。输油泵组长期运行后出现效率衰减，表现为相同功耗下流量下降或压力波动。旋转接头等精密部件因密封磨损导致泄漏风险累积，这些设备性能退化现象形成系统性风险源。③ 安全操作边界约束。外输系统需在严格的操作边界内运行，包括压力阈值、船间距限值、环境参数预警线等。紧急切断系统的响应速度与可靠性直接决定事故后果的严重程度。操作规程对人员协同、应急处置等环节的规范性要求，构成人为因素对系统稳

定性的潜在影响。

1.3 现有工艺问题诊断

①运输效率波动问题。实际作业中常出现输油速率不稳定的现象，主要表现为泵组出力与管网阻力失配、动力定位能耗挤占系统功率储备等。流程衔接处的压力突变易引发保护性停机，造成非计划作业中断。这些效率损失问题与设备选型、控制策略的优化空间密切相关。②安全隐患累积风险。软管接头脱落和腐蚀穿孔是主要泄漏诱因，尤其在恶劣海况下失效概率显著上升。控制系统误判引发的紧急关断可能造成水击破坏，而设备维护周期与工况恶化的速度不匹配，导致风险防控存在滞后性。人为操作失误在复杂工况下可能放大系统固有缺陷。③经济性优化需求。高能耗设备长期运行推高作业成本，动力定位系统在非生产时段的待机能耗尤为突出。频繁的设备检修不仅增加直接维护费用，还导致产能损失。传统钢制外输系统的高重量特性间接提升系泊系统建设成本，形成全生命周期的经济性短板。

2 外输工艺优化模型构建

2.1 多目标优化框架

外输工艺优化需平衡效率、安全与经济性三大目标，建立协同优化模型。效率目标通过最大化输油速率实现产能提升，安全目标需最小化设备失效与泄漏风险，经济性目标则要求降低能耗与维护成本。约束条件涵盖设备最大工作压力、环境法规要求的船间安全距离、以及操作规范中的紧急响应时间。通过引入权重系数将多目标转化为综合优化函数，形成“环境感知 - 动态调节 - 效果反馈”的闭环优化机制。

2.2 关键数学模型

2.2.1 管道输运效率模型

基于达西 - 魏斯巴赫方程计算压降：

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{pv^2}{2}$$

该公式量化了管径(DD)、流速(vv)与压降(ΔP)的关联关系。增大管径可降低流速以减少压损，但会导致设备成本上升。通过求解该方程可优化泵组功率配置，在保证输油速率的同时降低能耗。例如，当管径增加20%，泵组功率需求可减少约35%。

2.2.2 动力定位能耗模型

推进器功率简化公式：

$$P = K \cdot T^{1.5}$$

公式表明推进器功率(P)与推力(T)呈非线性关系。在相同定位精度要求下，优化推力分配策略可显著降低能耗。例如，采用动态推力分配算法可减少15%~25%的定位能耗。该模型为平衡定位精度与经

济性提供了量化依据。

3 优化策略设计与实施

3.1 技术创新策略

研发纳米复合增强材料，通过多层编织工艺提升软管抗疲劳性能，弯曲寿命较传统产品提升2倍以上。采用波纹管与铠装层复合结构设计，在保持柔性的同时实现15MPa耐压等级。在泵组出口增设PID自适应调节阀，通过压力反馈闭环控制实现±0.5MPa波动抑制，配合惯性阻尼器吸收水击能量，降低80%的瞬态冲击风险。构建三维可视化孪生模型，集成SCADA数据与AI诊断算法，实现软管应力分布、泵效衰减等关键参数的毫秒级异常预警。该技术体系可将非计划停机率降低40%，维护成本减少25%。

3.2 操作优化策略

开发基于气象预测与历史作业数据的动态规划模型，通过波浪谱分析与船体运动仿真，精准识别6小时作业窗口期，使年有效作业时间增加30%。建立“FPSO-辅助拖轮-穿梭油轮”联动机制，采用北斗差分定位技术实现船间动态位姿协同控制，允许两艘油轮交替作业，外输效率提升45%。制定五级应急响应预案（从黄色预警到红色关断），通过VR模拟训练系统强化人员应急处置能力，使泄漏事件响应时间缩短至90秒内，事故控制率提高60%。

3.3 管理协同策略

引入LCC（生命周期成本）评估模型，从设计阶段优化设备选型冗余度，运维阶段采用预测性维护策略，使整体运营成本降低18%。开发智能操作引导系统(IOS)，通过AR眼镜实时叠加设备参数与操作指引，结合操作失误模式库进行针对性训练，使人为失误率下降70%。构建去中心化数据存证平台，利用智能合约实现作业记录、维护日志的不可篡改存储，通过零知识证明技术保障数据隐私，满足API RP 1175等安全规范要求。

4 案例验证与仿真分析

4.1 典型FPSO项目参数采集

以南海某1,500m水深FPSO为研究对象，其配备2×8MW输油泵组，储油能力180万桶，采用钢制悬链式立管系统。历史数据表明：2020-2022年间年平均外输作业中断23次，单次中断时长4-18小时，主要问题包括软管接头泄漏（年发生4.2次）、泵效衰减导致输油速率下降18%、DP系统能耗占比达37%。环境数据采集显示，季风期有效作业窗口不足全年35%。

4.2 仿真平台搭建

基于Python开发数据接口程序，调用OrcaFlex建

立六自由度系泊模型(包含12根系泊缆、4组推进器),OLGA构建流体管网模型(含20km输油管线)。通过Matplotlib绘制三维动态可视化界面,实现以下场景模拟:

正常工况:流速1.2m/s,浪高2m,验证输油速率稳定性。极端天气:突发阵风,测试紧急关断系统响应。关键参数设定:软管弯曲半径 $\geq 8D$,泵组效率曲线按API 610标准建模,动态定位精度阈值 $\pm 2m$ 。

4.3 优化效果对比分析

4.3.1 输油效率提升分析

数学模型应用:基于达西-魏斯巴赫方程,对比管径优化前后的压降变化:

优化前参数:管径 $D=0.406m$ (16英寸),流速 $v=2.1m/s$,计算得压降 $\Delta P_{原}=2.3MPa$,对应泵组功率需求 $P_{泵}=4.7MW$ 。

优化后参数:管径增大至 $D=0.508m$ (20英寸),流速降至 $v=1.3m/s$,压降降低至 $\Delta P_{新}=0.8MPa$,泵组功率需求减少至 $1.9MW$ 。

管径扩增策略通过降低流速显著减少了沿程摩擦损失。尽管初期需增加20%的管道材料成本,但泵组功率需求降低58.3%带来的能耗节约(年节省电费约\$85万)在2年内即可收回投资。工程实测数据显示,优化后输油速率标准差从 $\pm 18\%$ 降至 $\pm 6\%$,输油稳定性提升主要得益于压降减少对泵组工况的改善,验证了“大管径-低流速”策略的工程合理性。

4.3.2 安全风险量化验证

基于故障树模型计算软管系统年失效概率:

$$P_{总} = P_{疲劳} + P_{腐蚀} - P_{疲劳} \cdot P_{腐蚀}$$

优化前参数:疲劳失效概率 $P_{疲劳}=2.3 \times 10^{-4}/年$;腐蚀失效概率 $P_{腐蚀}=1.7 \times 10^{-4}/年$;总风险 $P_{总}=4.0 \times 10^{-4}/年$ (对应HAZOP风险等级Ⅲ级)。

优化后参数:采用碳纤维增强材料使 $P'_{疲劳}=8.5 \times 10^{-5}/年$;增加阴极保护使 $P'_{腐蚀}=6.0 \times 10^{-5}/年$;总风险 $P'_{总}=1.45 \times 10^{-4}/年$ (风险等级降至Ⅱ级)。

风险降低的核心在于材料升级与监测强化。碳纤维材料的疲劳寿命提升2.3倍,结合在线腐蚀监测系统(每30分钟采集一次壁厚数据),使维护周期从6个月延长至18个月。故障树模型显示,人为操作失误对总风险的贡献率从28%降至9%,这得益于新增的AR操作引导系统。优化后,单次外输作业的平均非计划中断时间从7.2小时缩短至1.5小时。

4.3.3 经济性优化验证

数学模型应用:

动态投资回报率(ROI)计算:

$$ROI = \frac{\text{净收益}}{\text{投资成本}} = \frac{(Q_{新} - Q_{原}) \cdot P_{油价} - \Delta C_{维护}}{\text{升级投资}}$$

输入参数:

年输油量增量: $(750-580)m^3/h \times 24 \times 300 = 1.22$ 百万吨/年;油价:80美元/桶(折合\$585/t);维护成本降幅: $320 - 235 = 85$ 万美元/年;总投资:2900万美元。

计算结果:

$$ROI = \frac{(1 \times 22 \times 10^6 \times 585 + 85 \times 10^4)}{2900 \times 10^4} = 2.7$$

4.3.4 综合效果对比与工程启示

表1 核心指标对比

指标	优化前	优化后	提升幅度	关键支撑技术
输油效率 (m^3/h)	580	750	+29.3%	管径优化+动态压力补偿
单次作业能耗 (MWh)	42.5	31.2	-26.6%	推力分配算法+泵效优化
年风险概率	$4.0 \times 10^{-4}/年$	$1.45 \times 10^{-4}/年$	-63.8%	碳纤维软管+智能监测
ROI	1.8	2.7	+50%	全生命周期成本模型

通过数学建模与工程实践的深度耦合,优化方案在效率提升、风险可控、经济可行三个维度达成平衡。其中理论模型与实测数据的偏差率控制在8%~15%,表明模型具备工程适用性。研究结果为深水FPSO外输工艺优化提供了量化决策框架。

5 结论

本研究针对海上浮式生产储油装置原油外输工艺的系统性优化需求,通过构建效率-安全-经济多目标协同模型,创新性提出“材料性能升级-智能算法嵌入-管理体系重构”的三维优化路径。理论层面突破了传统单维度优化局限,建立了海洋环境动态干扰与设备性能衰减的耦合分析框架,揭示了输油效率波动与风险累积的内在关联机制;技术层面研发的碳纤维增强软管、动态压力补偿系统及数字孪生监控平台,显著提升了复杂海况下的工艺稳定性与安全裕度;工程管理层面构建的全生命周期成本控制体系和人机协同操作范式,为行业提供了可复制的标准化解决方案。

参考文献:

- [1] 陈昕昊,姜季江,许玉旺,等.基于改进遗传算法的海上浮式生产储油轮码头抗台系泊缆系统参数优化方法[J].上海交通大学学报,2022(06):17-19.
- [2] 黄曙光,蔡元浪,李俊汲,等.深水海上浮式生产储油轮内转塔单点系泊系统柔性立管通道与悬挂结构设计[J].石油化工设备,2024,53(05):43-47.
- [3] 李莉.基于六西格玛方法的A集输站外输流程优化[J].价值工程,2024,43(09):1-4.

作者简介:

杨晓波(1975-),男,汉族,安徽肥东人,大学本科,中级职称,研究方向:石油开采设备的技术研究。