

文章编号: 1007-7294(2025)11-1793-12

基于贪心算法的半潜式平台快速移井 优化方法研究

黄龚赛¹, 武文华^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 在海上油气生产过程中, 半潜式平台通过各系泊链的收放实现水下井口间的移井操作。本文针对传统移井方法无法快速获得有效移井方案的难点, 提出了一种基于贪心算法的半潜式平台快速移井优化方法。针对三组现场移井操作方案, 开展锚机正常工作和锚机故障下的移井方案优化分析。结果表明锚机正常工作状况下, 优化方案与原始方案和遗传算法获得的全局最优方案相比, 在优化效果和计算成本方面得到显著提升。锚机失效情况下, 移井操作的可行性与移井距离和移井方向密切相关。将锚机失效情况下的移井方案与正常工作下的移井方案进行分析比较, 发现锚机失效后移井操作的系泊链收放长度及操作步数均有不同程度的增加, 平稳程度随工况不同变化趋势不唯一。

关键词: 半潜式海洋平台; 移井操作; 贪心算法; 锚机失效

中图分类号: U661.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.11.012

A fast well relocating optimization method of semi- submersible platform based on greedy algorithm

HUANG Gong-sai¹, WU Wen-hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: In the process of oil and gas development, semi-submersible platforms operate relocation between wells by retracting and releasing mooring chains. In this paper, a fast well relocating optimization method of semi-submersible platform based on greedy algorithm was proposed in view of the traditional method that cannot obtain relocation strategy quickly. Three sets of relocation operations were selected in this study, an optimization analysis of relocation strategy was carried out for windlasses normal operation and windlasses failure operation. The results show that under normal operation, the optimized strategy has a significant improvement in terms of optimization effect and calculation cost compared with the original strategy and the best strategy. Under windlasses failure operation, it shows that the feasibility of relocation is closely related to the distance and direction of the relocation operation. A comparison of relocation strategy was made between the normal operation and the windlasses failure operation, it was found that the retracted length of the

收稿日期: 2024-09-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1003501); 国家自然科学基金资助项目(12432005); 航空科学基金资助项目(2022Z061001)

作者简介: 黄龚赛(1996-), 男, 博士研究生; 武文华(1973-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: lxyhua@dlut.edu.cn。

mooring chains and the number of operating steps increased under windlasses failure operation, and the stability keeps changing with different working conditions.

Key words: semi-submersible floating platform; well relocating operation; greedy algorithm; windlass failure

0 引言

半潜式平台作为一种海上油气生产设备,具有抗风浪能力强、稳定性好等优点,广泛应用于深水和超深水海域^[1-2]。为提高海上油气资源的产量,常在同一海域钻设多个井口,通过锚机调节各系泊链的长度实现平台在各井口间移井作业^[3]。当平台受台风等影响时,需要将平台移到中心井位。

目前,半潜式平台移井方案主要有两种。一种是依赖历史数据和人员经验制定移井方案,此方法缺乏理论依据,且需要各部门共同讨论实施,耗费大量的人力成本,若移井方案选取不当易造成平台倾角过大,发生稳性失效;另一种是利用全局优化算法计算获得最优移井方案,此方法精度虽高,但计算时间较长,移井方案计算效率低,影响生产进度。

在移井过程中,将采用悬链线控制方程计算系泊恢复力,通过调节系泊链长度微调平台位置。Dat^[4]通过改变系泊长度调整平台位置,确保钻井船的立管处于钻井和修井作业的安全范围内。Rodrigues等^[5]提出了一种由可移动浮动涡轮机组成的风电场布局优化策略,可同时优化每根系泊链的长度和风力涡轮机位置,以获得最大的产能。Ali^[6]基于系泊控制方程对海上浮式风机偏航定位系统(Yaw and induction-based turbine repositioning, YITuR)进行评估,利用仿真计算,获得发电效率最优情况下的系泊长度及平台位置。Skjetne等^[7]基于悬链线控制方程提出了一种适用于浮式生产储卸油装置(Floating production storage and offloading, FPSO)的推进器辅助系泊定位方法,以此实现移井定位,同时可避免因服役过程中系泊链张力过大而引发的系泊失效。郭强^[8]和秦川^[9]分别以系泊造价成本最小和系泊恢复力最大为目标函数,基于遗传算法开展不同井口下的系泊长度优化。Nguyen等^[10-13]将不受风、浪、流和推进力作用的平台平衡位置定义为井口零点,并基于系泊控制方程计算了FPSO移井前后井口零点位置与系泊张力变化。

贪心算法由Herbert A. Simon于1956年提出,其核心思想是在每一步选择中都采取当前状态下的最优选择,以期最后得到全局最优解(这种算法在每一步都采取局部最优策略,依靠每一步的贪心选择来快速得到一个解决方案)。贪心算法具有计算高效、易于现场实施等优点,能很好地解决海洋工程领域的优化问题。

本文依托于某半潜式平台开展快速移井优化方法研究,形变基于多成分悬链线控制方程,建立了不同井口下系泊链长度与顶张力的关系数据集。将平台移井过程中的平稳程度作为优化指标,基于贪心算法构建快速移井优化模型。从历史移井数据中选取三组移井操作开展快速移井优化研究,分别从优化效果和计算成本两方面进行比较分析。同时还考虑了随服役年限增加锚机可能存在的失效问题,开展了针对单一锚机故障下不同井口下移井方案的可行性研究。利用贪心算法计算获得不同锚机故障下的移井优化方案,并与锚机正常工作下的移井优化方案进行比较分析。

1 半潜式平台快速移井优化方法研究

图1为快速移井优化模型计算流程图,共分为三步。第一步,基于多成分悬链线控制方程构建各井口下系泊链长度与受力的关系集。第二步,根据锚机安全状况,判断当前井口位置进行移井操作的可行性,若能满足正常移井操作需求,则以系泊链总收放长度最短为原则选取各系泊链的收放长度。第三步,以移井过程中平台平稳程度作为目标函数,利用贪心算法优化移井路线,从而获得完整的移井方案。

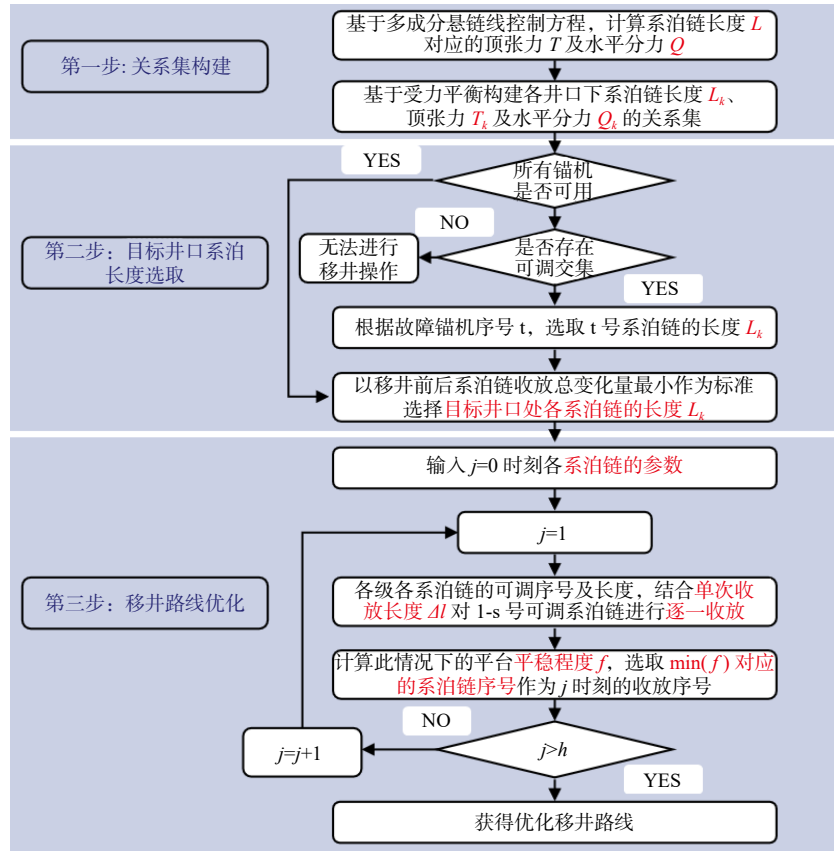


图 1 移井优化方案流程图

Fig.1 Flow chart of well relocating optimization plan

1.1 基于多体动力特征的聚类数据选取

在半潜式平台服役过程中, 为降低系泊成本和重量, 多成分系泊系统成为运用最广泛的系泊方式^[14]。假定单根系泊链位于同一平面内, 以系泊链所在平面与海床面交线为 x 轴, 垂直海床面为 y 轴, 以系泊链与海床端固定点为坐标原点 O , 建立如图 2 所示的坐标系。基于悬链线法的多成分系泊链的控制方程组^[15] 如下:

$$\tan \theta_i = \frac{\sum_{i=1}^m w_i L_i}{Q}, \tan \theta_{m+1} = 0 \tag{1}$$

$$S_i = \frac{Q}{w_i} \left[\sinh^{-1}(\tan \theta_i) - \sinh^{-1}(\tan \theta_{i+1}) \right] \tag{2}$$

$$H_i = \frac{Q}{w_i} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \theta_i} - \sqrt{1 + \tan^2 \theta_{i+1}} \right] \tag{3}$$

$$H = \sum_{i=1}^m H_i, S = \sum_{i=1}^m S_i, L_m = L_{m,c} + L_{m,r}, S_m = S_{m,c} + S_{m,r} \tag{4}$$

$$T = \sqrt{Q^2 + \left(\sum_{i=1}^m w_i L_i \right)^2} \tag{5}$$

其中, $L_i (i=1, \dots, m)$ 为各段系泊链的长度, m 为系泊链的成分数, $L_{m,c}$ 、 $L_{m,r}$ 分别为提起段和拖地段的系泊链长度, $\theta_i (i=1, \dots, m)$ 是各段系泊链顶部与 x 轴的夹角, θ_{m+1} 为触地点与 x 轴的夹角, 为 0° , T 为系泊链顶端切线方向的顶部张力, Q 为 T 的水平分量, $w_i (i=1, \dots, m, c)$ 为各段系泊链在水中的重量, S_i 、 $H_i (i=1, \dots, m, c, m, r)$ 分别为各段系泊链在水平方向和垂直方向(水深方向)的投影长度。

$$\left\{ \begin{aligned} \delta\theta_j &= \frac{\sum_{i=1}^s \delta P_{k,j}(y_j - y_{k,j})}{\left(\Delta_j + \sum_{i=1}^s \delta P_{k,j}\right) \overline{GM}_T} \\ \delta\varphi_j &= \frac{\sum_{i=1}^s \delta P_{k,j}(x_j - x_{k,j})}{\left(\Delta_j + \sum_{i=1}^s \delta P_{k,j}\right) \overline{GM}_L} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \delta d_{FP,j} &= \left(\frac{L}{2} - x_j\right) \tan \delta\varphi_j + \left(\frac{B}{2} - y_j\right) \tan \delta\theta_j \\ \delta d_{AP,j} &= -\left(\frac{L}{2} + x_j\right) \tan \delta\varphi_j + \left(\frac{B}{2} - y_j\right) \tan \delta\theta_j \\ \delta d_{FS,j} &= \left(\frac{L}{2} - x_j\right) \tan \delta\varphi_j - \left(\frac{B}{2} + y_j\right) \tan \delta\theta_j \\ \delta d_{AS,j} &= -\left(\frac{L}{2} + x_j\right) \tan \delta\varphi_j - \left(\frac{B}{2} + y_j\right) \tan \delta\theta_j \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_j &= \frac{\Delta_{j-1} x_{j-1} + \delta P_{k,j-1} x_{k,j-1}}{\Delta_{j-1} + \delta P_{k,j-1}} \\ y_j &= \frac{\Delta_{j-1} y_{j-1} + \delta P_{k,j-1} y_{k,j-1}}{\Delta_{j-1} + \delta P_{k,j-1}} \\ z_j &= \frac{\Delta_{j-1} z_{j-1} + \delta P_{k,j-1} z_{k,j-1}}{\Delta_{j-1} + \delta P_{k,j-1}} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

其中, Δ 为移井前的平台排水量, D 为平台移井前的吃水值, \overline{GM}_T 和 \overline{GM}_L 分别为平台移井前的横稳性和纵稳性, $\delta\theta$ 和 $\delta\varphi$ 分别为由收放系泊链引起的横倾角和纵倾角变化, x 、 y 、 z 分别为移井前平台重心的横坐标、纵坐标及垂向坐标值, δP_k 为 k 号系泊链收放前后的重量变化, 收为正, 放为负, $\delta d_{FP,j}$, $\delta d_{FS,j}$, $\delta d_{AP,j}$, $\delta d_{AS,j}$ 分别船艏左舷、右舷和船艉左舷、右舷的吃水增量, L 为船长, B 为船宽, x_k 、 y_k 、 z_k 分别为锚链舱的横坐标、纵坐标及垂向坐标值。

图 3 为基于贪心算法的移井路径优化示意图, 选取 j 时刻进行研究^[21]。由前一时刻 ($j-1$ 时刻) 的计算可知 j 时刻平台的浮态、系泊受力和系泊链剩余可调长度。根据贪心算法的计算原理对 1 至 s 号的系泊链进行逐一调节, 获得共 s 种 $j+1$ 时刻的平台的浮态, 从中选取该时刻平稳程度最优的收放序号作为 j 时刻系泊链的收放序号。重复此步骤, 可获得整个移井过程的移井路线。

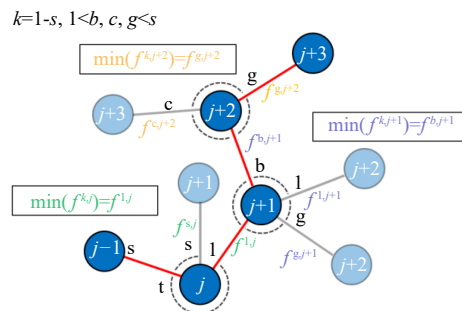


图 3 基于贪心算法的移井路径优化示意图

Fig.3 Optimization of well relocating path based on greedy algorithm

2 锚机正常工作下移井方案分析和讨论

2.1 某半潜式平台参数介绍

本文以南海某半潜式平台为例开展研究分析, 平台采用双浮筒八立柱的主体结构形式, 其浮体主要参数如表 1 所示^[22]。

表 1 南海某半潜式平台主要参数

Tab.1 Main parameters of FPS at South China Sea

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|--------------|-------|-------------|----------|
| 总长/m | 102.4 | 主甲板高度/m | 39.6 |
| 型宽/m | 76.5 | 作业工况吃水/m | 22.8 |
| 船艏立柱中心线距离/m | 68.6 | 相对于基线重心高度/m | 21.7 |
| 左右舷立柱中心线距离/m | 59.4 | 排水量/t | 28 250.0 |

如图 4 所示,平台系泊系统采用 11 根系泊链非对称布置,其初始艏向角设置为 307°(方位角定义为正北 0°,正东 90°)。每根系泊链由四部分组成,从平台至海床分别为平台锚链、悬挂钢缆、卧地锚链和锚端钢缆,各段参数如表 2 所示^[23]。平台底部海床上钻设 4 片井口区域,由 25 个 A-D 编号井口与 1 个中心井口组成,两排井口呈前后排布,朝向为 305°,如图 5 所示。

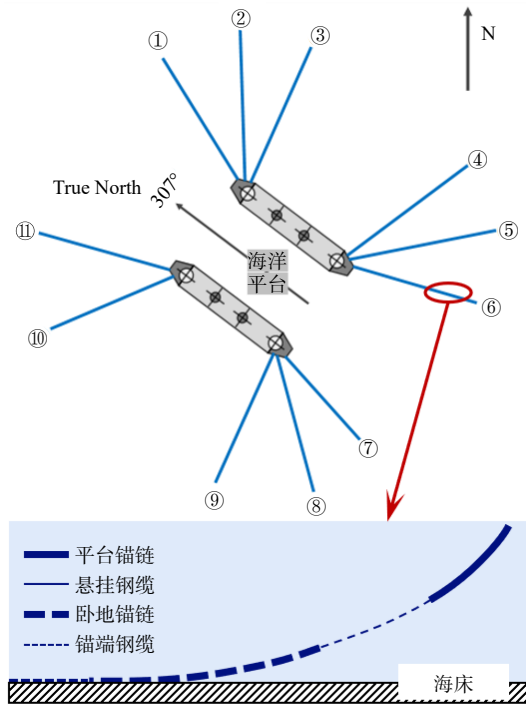


图 4 南海某 FPS 系泊系统布置示意图

Fig.4 Layouts of mooring system of a Nanhai FPS

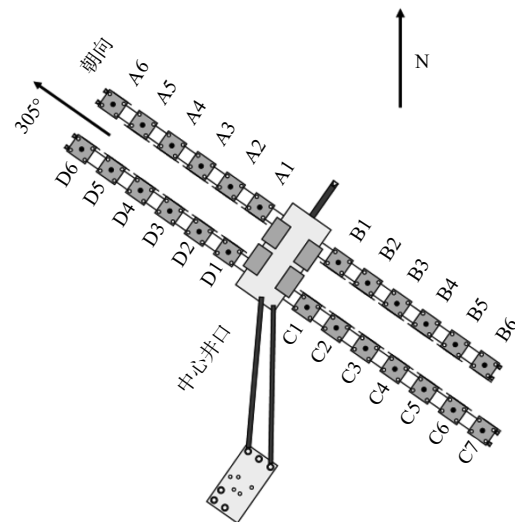


图 5 南海某 FPS 海底井口示意图

Fig.5 Layouts of well locations of a Nanhai FPS

表 2 系泊链参数

Tab.2 Main parameters of mooring lines

| | 环境 | 平台锚链 | 悬挂钢缆 | 卧地锚链 | 锚端钢缆 |
|-----------------------------------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|
| 系泊链重量/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$) | 空气中 | 0.274 | 0.0707 | 0.369 | 0.0707 |
| | 水中 | 0.316 | 0.0841 | 0.414 | 0.0842 |
| 系泊链长度/m | | 220.98 | 502.92 | 609.60 | 121.92 |

2.2 优化方案的可行性分析

为验证贪心算法优化的可行性,从历史记录中选取三组距离为短(C5-B6)、中(D2-C1)、中长(D5-A1)的移井操作进行计算,将计算方案分别与遗传算法^[24]算得的全局最优方案^[8-9]和现场采用的原始方案^[25]进行对比分析。

本文基于南海某平台实际移井状况,选取操作均值 1.5 m 作为系泊链的单次收放长度,在硬件环境为

Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @ 2.90 GHz, 8.0GB RAM 的计算机上进行优化计算。图 6 为三种方案的平稳程度曲线, 通过对比 C5-B6、D2-C1、D5-A1 三组移井操作, 发现相对于原始方案, 贪心算法在移井过程中的平稳程度分别提高了 71.10%、90.26% 和 75.02%, 得到了显著改善。在计算成本方面, 遗传算法需要分别迭代 5、12、4 步后, 其平稳程度才优于贪心算法, 此时遗传算法耗费的计算时长为贪心算法的 8.69、27.57 和 99.03 倍。图 7 展示了遗传算法的收敛过程, 经过 100 次迭代后, 结果分别收敛于 0.0497 m、0.0692 m 和 0.0991 m, 与计算方案相比, 平稳程度仅改善了 10.28%、0.40% 和 3.03%, 优化效果甚微, 而计算成本远高于本文所提方法, 详细计算结果如表 3 所示。

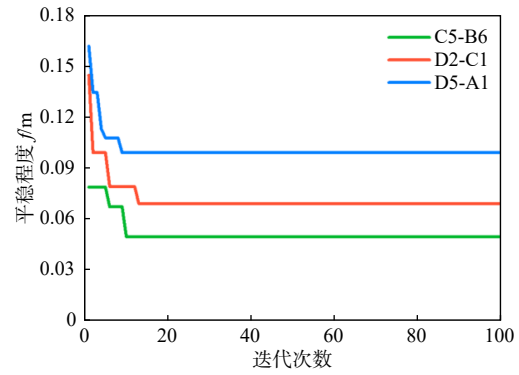


图 7 遗传算法收敛过程

Fig.7 Convergence process of Genetic Algorithm

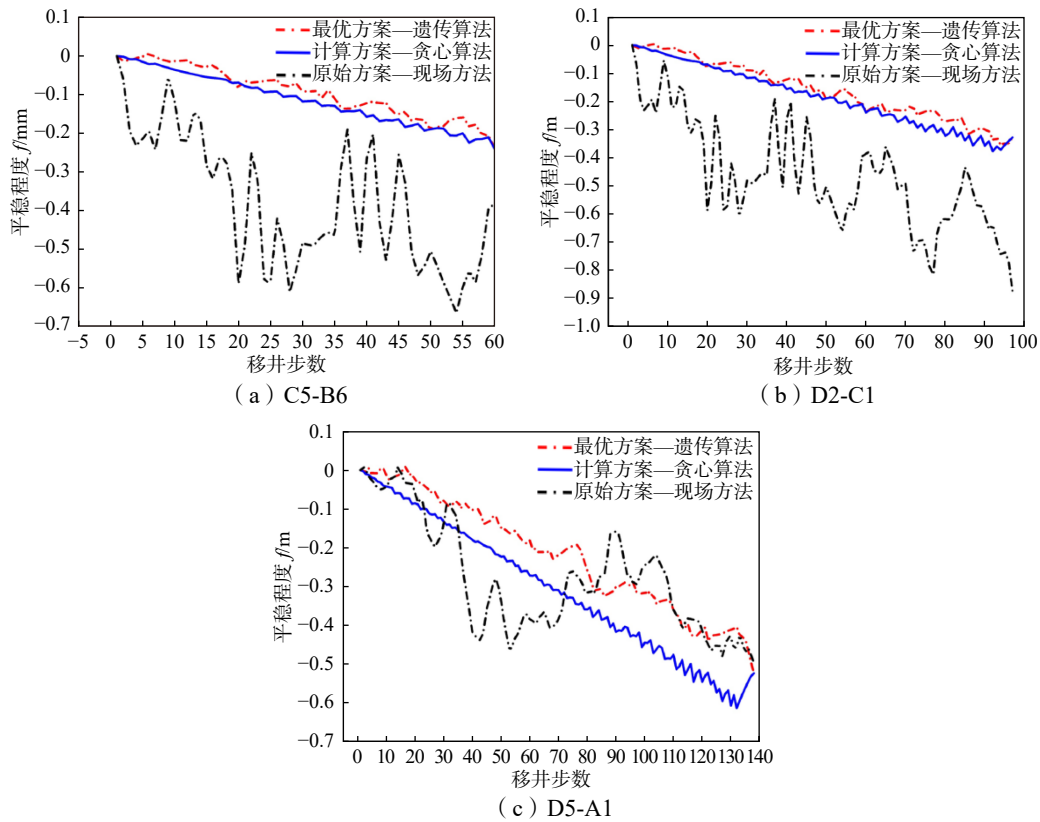


图 6 不同方案平台移井平稳程度对比图

Fig.6 Comparison of FPS stability by different schemes

表 3 不同方法计算效果对比

Tab.3 Comparison of the calculation results by different methods

| 对比项 | 移井操作 | | |
|------------------|---------|----------|----------|
| | C5-B6 | D2-C1 | D5-A1 |
| 计算耗时 (计算方案/原始方案) | - | - | - |
| 计算耗时 (计算方案/最优方案) | 869.88% | 2757.05% | 9903.60% |
| 平稳程度 (计算方案/原始方案) | 71.10% | 90.26% | 75.02% |
| 平稳程度 (最优方案/计算方案) | 10.28% | 0.40% | 3.03% |

图8给出了平台在计算方案下的移动轨迹,终点与目标井口B6、C1和A1的距离分别差0.471 m、0.128 m和0.235 m,均在平台作业所容许的位置偏差范围内。

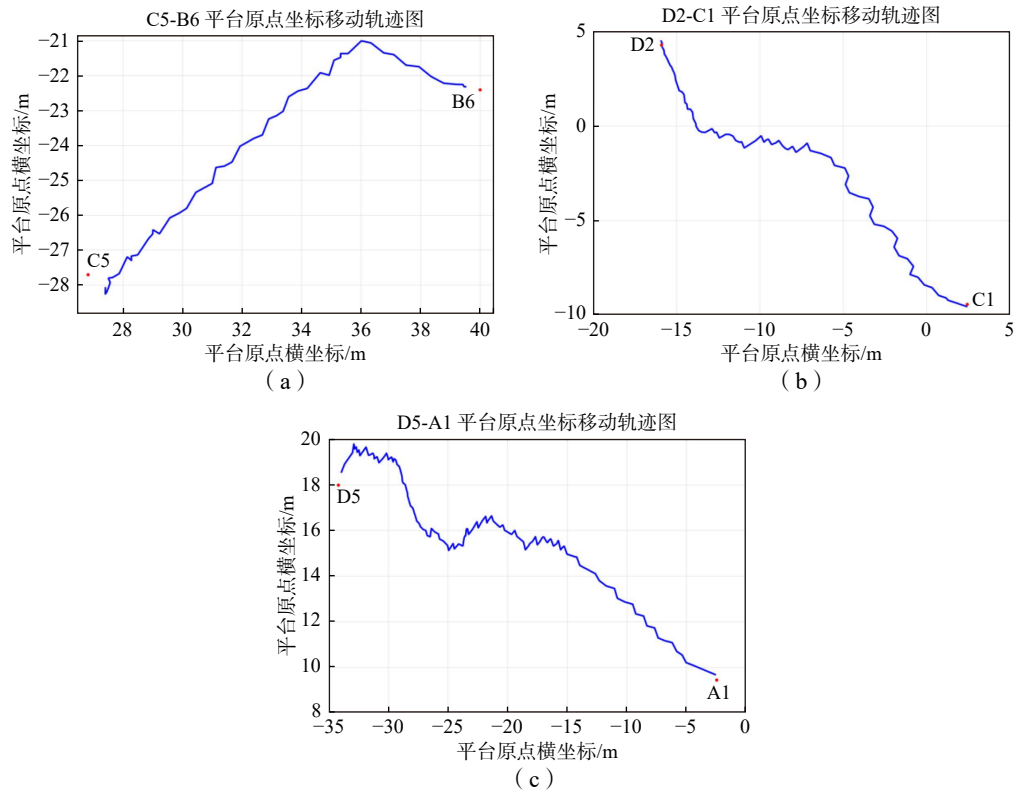


图8 移井路线轨迹图

Fig.8 Well relocating route trajectory

3 考虑锚机故障行为的移井案例分析和讨论

3.1 考虑锚机故障的移井可行性分析

移井操作的可行性与系泊链的可调长度及两井口间的位置密切相关^[26]。当锚机发生故障时,系泊链无法进行调节,若此时目标井口距离过大,将无法实施移井操作。因此,需要针对不同锚机的故障情况开展移井可行性分析。

图9展示了1号和4号系泊链在各井口处的可调长度,图中A、B、C、D为各井口区域,横坐标分别代表各井口编号。以1号系泊链为例,图中立柱长度代表系泊链的可调范围,柱底与柱顶数值分别代表平台锚链在该井口处可放出的最小长度 $L_{1,\min}$ 和最大长度 $L_{1,\max}$ 。两柱间的纵轴重叠部分为可调交集(红色虚线),若系泊长度位于交集内,则在移井操作时无需调节该号系泊长度即可将平台移至目标井口。因此该可调交集可作为锚机失效时系泊链长度的选取原则,即当锚机发生故障时,若两井口间存在可调交集,则认为可进行移井操作,否则无法实施移井操作。

对比图9可知,井口间存在可调交集的概率和长度与故障锚机编号和移井路线密切相关。为了量化不同锚机发生故障时移井操作的可行性,定义 ψ 为主要移井方向,即故障锚机的锚链与井口排布方向的夹角,无量纲量 η 为可移率, ζ 为移井最远距离比($\eta, \zeta \in [0,1]$)。 η 和 ζ 越大,表明对应锚机失效时平台移井的可行性概况越高。其中 η 和 ζ 的表达式如下:

$$\begin{cases} \eta = \frac{\eta_i}{N} \\ \zeta = \frac{\xi_{\max}}{D} \end{cases} \quad (13)$$

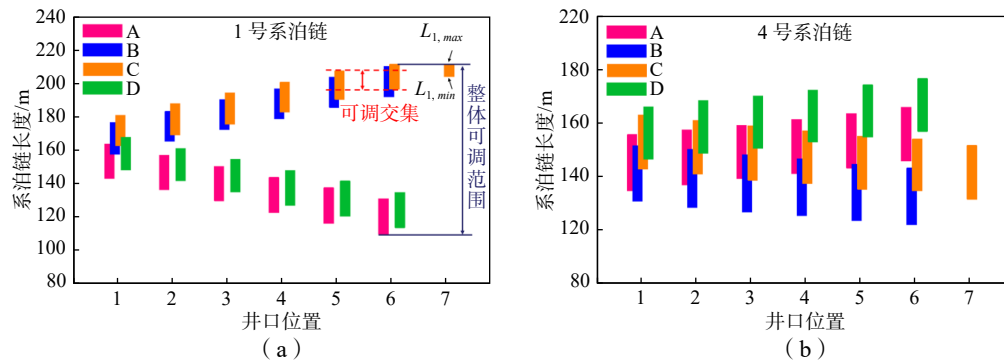


图 9 不同井口下各系泊链的可调长度

Fig.9 Adjustable lengths of each mooring chain at different wells

式中： η_i ($i=1, 2, \dots, 11$)为不同平台锚链在两井口间的存在可调交集的总数， N 为所有井口间存在移井可能的总数，本文取 300， ζ_{max} 为存在可调交集的两井口的最大距离， D 为所有井口间的最大距离，即 A6 井口至 C7 井口的距离。

表 4 对移井操作的可行性进行了详细的总结，由表可知平台锚链的整体可调范围受夹角 ψ 所影响， ψ 越小，顶张力水平分力分解至移井方向上的力越大，在同等受力下，平台沿目标井口移动的距离越大，导致各井口间的可调交集越少，平台锚链的整体可调范围越大；反之则平台锚链的整体可调范围越小。因此当故障锚机的方向与主要移井方向平行时，则需要优先考虑 1、6、7、11 号系泊链对移井操作可行性的影响，其次是 2、5、8、10 号系泊链，最后考虑 3、4、9 号系泊链；当故障锚机的方向与主要移井方向垂直时，则需要优先考虑 3、4、9 号系泊链对移井操作可行性的影响，其次考虑 2、5、8、10 号系泊链，最后考虑 1、6、7、11 号系泊链。此结论可用于紧急情况下平台移井方案的制定，并为平台锚机安全维护顺序提供指导。

表 4 各系泊链至各井口的可行性参数分析

Tab.4 Adjustability analysis of each mooring chain to each well

| 系泊链序号 | 主要移井方向 (ψ) | η | ζ | 系泊链序号 | 主要移井方向 (ψ) | η | ζ |
|-------|-------------------|--------|---------|-------|-------------------|--------|---------|
| 1 | 21° | 37.67% | 0.26 | 7 | 8° | 41.33% | 0.26 |
| 2 | 50° | 50.00% | 0.40 | 8 | 36° | 49.00% | 0.33 |
| 3 | 78° | 89.00% | 0.99 | 9 | 79° | 92.67% | 0.92 |
| 4 | 74° | 89.67% | 0.84 | 10 | 59° | 51.33% | 0.55 |
| 5 | 48° | 52.67% | 0.47 | 11 | 19° | 37.00% | 0.26 |
| 6 | 22° | 42.67% | 0.33 | | | | |

3.2 锚机失效下移井优化方案

为了研究锚机失效对移井操作的影响，本节针对单一锚机失效情况下上述三组移井操作的移井优化方案进行分析。

表 5 给出了相较于正常工况，当锚机失效时不同移井参数(包括系泊链收放长度、操作步数和平稳程度)的相对增量。其中，正常工况下 C5-B6、D2-C1 和 D5-A1 的移井参数已由第二章给出，即图 6 中的蓝线。由表可知锚机失效情况下移井操作的可行性与移井距离和移井方向密切相关，距离越小，移井操作的可行性越高，且故障系泊链与移井方向一致时，移井操作的可行性越低。C5-B6 移井距离较短，1、2、5、6、7、8 号锚机发生故障时均可实施移井操作。D2-C1 移井距离适中，3、4 和 9 号锚机发生故障时均能实施移井操作。D5-A1 移井距离较长，仅在 2 和 3 号锚机发生故障时能实施移井操作。

表5 相较于正常工况,当锚机失效时系泊链收放长度、操作步数和平稳程度的相对增量
 Tab.5 Relative increments in mooring chain retraction and release length, number of steps and smoothness when the anchor fails compared to normal conditions

| 操作 | 失效锚机序号 | 对比项 | | |
|-------|--------|---------|--------|---------|
| | | 系泊链收放长度 | 操作步数 | 平稳程度 |
| C5-B6 | #1 | 17.53% | 12.73% | -4.02% |
| | #2 | 41.06% | 29.09% | -24.38% |
| | #5 | 45.57% | 38.18% | -28.92% |
| | #6 | 33.43% | 27.27% | -30.87% |
| | #7 | 44.90% | 38.18% | -31.13% |
| | #8 | 25.39% | 20.00% | -38.65% |
| D2-C1 | #3 | 14.48% | 12.37% | -12.19% |
| | #4 | 18.62% | 16.49% | -23.13% |
| | #9 | 19.91% | 17.53% | -11.22% |
| D5-A1 | #3 | 21.42% | 9.42% | 260.25% |
| | #4 | 24.96% | 11.60% | 61.50% |

当锚机失效时,整体的系泊链收放长度及操作步数都有不同程度的增加。在 C5-B6 和 D2-C1 移井过程中,平台的平稳程度均明显降低,而在 D5-A1 操作中则明显增加。主要原因是在 C5-B6 和 D2-C1 移井过程中,各系泊链的顶张力整体减小,使得平台在整个移井过程中的横倾和纵倾角度降低,从而提高了整体的平稳程度,移井过程更加安全。而在 D5-A1 移井过程中,系泊链的顶张力整体增大,使得平台在整个移井过程中的横倾和纵倾角度增大,从而降低了整体的平稳程度,移井过程更加危险。锚机失效时的平稳程度曲线如图 10 所示。

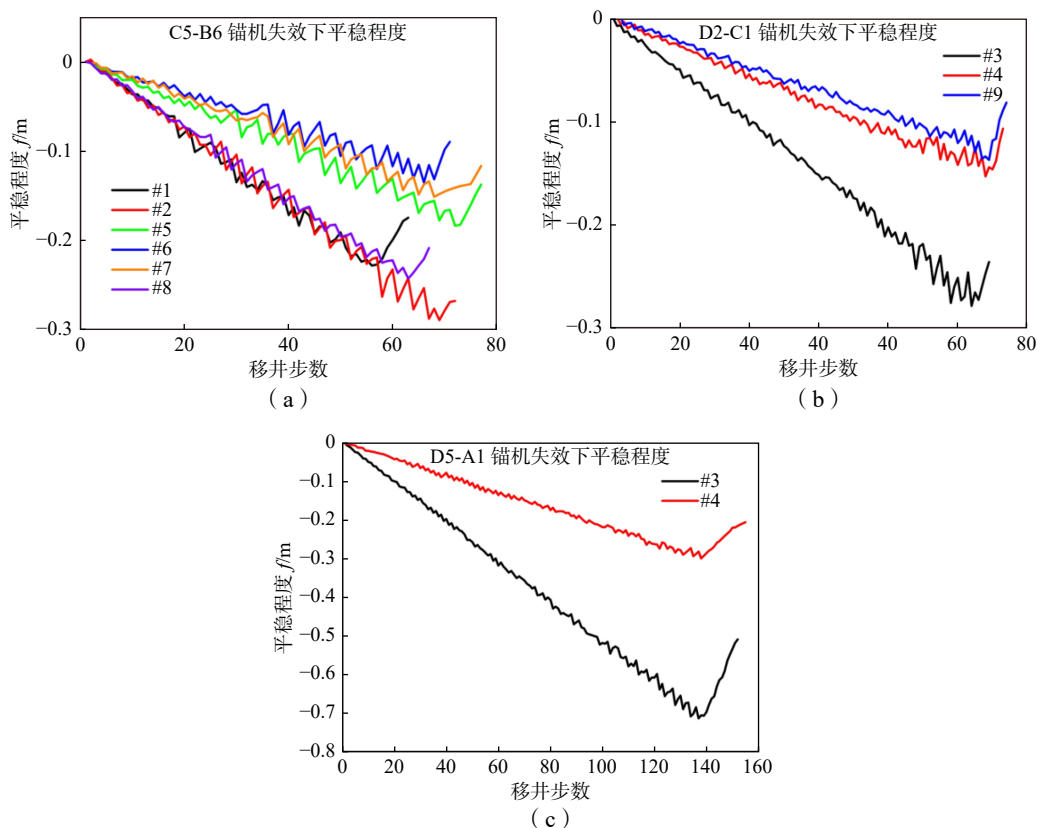


图 10 锚机失效下平台移井平稳程度对比图

Fig.10 FPS stability during well relocation process under different windlasses failure

4 结 论

本文依托于某半潜式平台,以移井过程中平台的平稳程度为优化指标,基于贪心算法获得快速移井优化方案。选取三组现场移井方案,分别与遗传算法获得的全局最优方案和现场采用的原始方案进行比较。与原始方案相比,本文计算方案的平稳程度分别提高了 71.10%、90.26% 和 75.02%。与最优方案相比,计算时长降低了 8.69、27.57 和 99.03 倍。综合考虑优化效果和计算成本,本文所用方法具有较强的优势。

结合不同锚机失效情况,对移井方案可调性进行分析,将两井口间的可调交集作为锚机失效时系泊链长度的选取原则。锚机失效情况下移井操作的可行性与移井距离和移井方向密切相关,当故障锚机的方向与主要移井方向平行时,则需要优先考虑 1、6、7、11 号系泊链对移井操作可行性的影响,其次是 2、5、8、10 号系泊链,最后考虑 3、4、9 号系泊链。

当故障锚机的方向与主要移井方向垂直时,考虑顺序相反。利用贪心算法计算锚机失效下的移井优化方案,与正常工作下的移井方案进行分析比较,发现锚机失效后移井操作的系泊链收放长度及操作步数均有不同程度的增加,平稳程度受系泊顶张力的影响有增有减。

目前,移井操作均选取在静态的海况下进行,我国南海海洋环境恶劣,一年可进行移井操作的天数屈指可数,下一步将开展考虑环境荷载影响的移井方法研究。

参 考 文 献:

- [1] Ronalds B F. Deepwater Facility Selection[C]//Offshore Technology Conference. Huston, Texas, USA, 2002.
- [2] 王天英,周 波. 自升式半潜平台时域耦合动力分析[J]. 石油工程建设, 2020, 46: 35–38.
Wang Tianying, Zhou bo. Coupled dynamic analysis of jackup combined semi-submersible multifunction platform in time domain[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46: 35–38. (in Chinese)
- [3] 梁党卫. 数字油田软件系统架构探究[J]. 信息与电脑(理论版), 2012(6): 52–53.
Liang Dangwei. Research on software system architecture of digital oilfield[J]. China Computer & Communication, 2012(6): 52–53. (in Chinese)
- [4] Dat H Nguyen, Dong T Nguyen, Ser T Quek, et al. Position-moored drilling vessel in level ice by control of riser end angles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 66(2-3): 65–71.
- [5] Rodrigues S F, Pinto R T, et al. Wake losses optimization of offshore wind farms with moveable floating wind turbines[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 89: 933–941.
- [6] Ali C, Kheirabadi, Ryoza Nagamune. Real-time relocation of floating offshore wind turbine platforms for wind farm efficiency maximization: An assessment of feasibility and steady-state potential[J]. Ocean Engineering, 2020, 208: 107445.
- [7] Skjetne R, Ren Z R. A survey on modeling and control of thruster-assisted position mooring systems[J]. Marine Structures, 2020, 74: 102830.
- [8] 郭 强. 基于遗传算法的系泊优化分析与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
Guo Qiang. Optimization analysis and application of mooring system based on genetic algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [9] 秦 川. 基于遗传算法的 CALM 系统软管及锚链优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
Qin Chuan. Optimization design of hose and mooring chain of CALM system based on genetic algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [10] Nguyen D T, Sørensen A J. Setpoint chasing for thruster-assisted position mooring[C]//The 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. San Diego, USA, 2007.
- [11] Nguyen D T, Blanke M, et al. Diagnosis and fault-tolerant control for thruster-assisted position mooring[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40: 287–292.

- [12] Nguyen D T, Sørensen A J. Setpoint chasing for thruster-assisted position mooring[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34: 548–558. (in Chinese)
- [13] Nguyen D T, Sørensen A J. Switching control for thruster-assisted position mooring[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17: 985–994.
- [14] Hermawan Y A, Furukawa Y. Coupled three-dimensional dynamics model of multi-component mooring line for motion analysis of floating offshore structure[J]. Ocean Engineering, 2020, 200: 106928.
- [15] Wu W H, Feng J G, et al. Development and sensing properties study of underwater assembled water depth-inclination sensors for a multi-component mooring, using a self-contained technique system[J]. Sensors, 2016, 16: 1925.
- [16] 罗 勇. 浮式结构定位系统设计与分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015.
Luo Yong. Design and analysis of station keeping system for floating structures[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2015. (in Chinese)
- [17] 罗 宁. 南海半潜式平台锚泊系统动力破坏与走锚失效研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
Luo Ning. Study on dynamic damage and anchor failure of semi-submersible platform mooring system in South China Sea[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017. (in Chinese)
- [18] 张 棘. 船舶稳性影响因素分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(17): 44–47.
Zhang Ji. Analysis of factors influencing ship stability[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(17): 44–47. (in Chinese)
- [19] 林 焰, 李铁骊, 纪卓尚. 破损船舶自由浮态计算[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 85–89.
Lian Yan, Li Tieli, Ji Zhuoshang. Ship damage floating calculation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(1): 85–89. (in Chinese)
- [20] 盛振邦. 船舶原理(上册)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
Zheng Shengbang. Ship theory[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. (in Chinese)
- [21] Nagano M S, Almeida F, et al. An iterated greedy algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem to minimize makespan subject to total completion time[J]. Engineering Optimization, 2020, 4: 1–19.
- [22] 申 辉, 朱为全, 等. 南海挑战号 FPS 系泊系统延寿疲劳性能评估[J]. 中国造船, 2019, 60: 91–99.
Shen Hui, Zhu Wei-quan, et al. Fatigue evaluation of mooring system life extension for Nanhai TiaoZhan floating production system in the South China Sea[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60: 91–99. (in Chinese)
- [23] 郭宝中. 流花 11-1 油田 FPS 扩展性系泊系统设计[J]. 中国海上油气工程, 1996, 8: 1–9+41–43.
Guo Baozhong. Design of FPS extending mooring system for Lühua 11-1 oilfield[J]. China Offshore Oil & Gas Engineering, 1996, 8: 1–9+41–43. (in Chinese)
- [24] Chen J, Lin Y, Huo J Z, et al. Optimization of ship's subdivision arrangement for offshore sequential ballast water exchange using a non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(11–12): 978–988.
- [25] 杜 宇, 武文华, 等. “南海挑战号”半潜式平台原型测量系统[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 1–7+21.
Du Yu, Wu Wenhua, et al. Prototype measurement system of Nanhai TiaoZhan FPS[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(3): 1–7+21. (in Chinese)
- [26] Ogbeifun A M, Oterkus S, Race J, et al. Vessel relocation strategy for multiple steel catenary riser fatigue damage mitigation[J]. Ocean Engineering, 2022, 248: 110493.