石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》（CA）收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊（美）
AAPG协会期刊出版平台收录期刊（美）
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

基于遗传算法的丛式井平台部署优化研究

张喜民

Optimization Study of Cluster Well Platform Deployment Based on Genetic Algorithm

ZHANG Ximin

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2024080

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大港油田大型井丛场高效钻井技术优化与应用

Optimization and Application of Efficient Drilling Technologies for Large-Scale Well Cluster Fields in Dagang Oilfield

石油钻探技术. 2022, 50(2): 51–57 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021116

长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术

ROP Improvement Technologies for Large-Cluster Horizontal Shale Oil Wells in the Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(4): 29–33 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021076

基于启发式算法的套管柱组合优化设计方法

Optimization Design Method for Casing String Combination Based on Heuristic Algorithm

石油钻探技术. 2020, 48(2): 42–48 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020011

机械式垂直钻具稳定平台影响因素模拟研究

Simulation Research on Influencing Factors of Stabilization Platform forMechanicalVertical Drilling Tools

石油钻探技术. 2022, 50(3): 51–60 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021106

基于AdaBoost机器学习算法的大牛地气田储层流体智能识别

Intelligent Fluid Identification Based on the AdaBoost Machine Learning Algorithm for Reservoirs in Daniudi Gas Field

石油钻探技术. 2022, 50(1): 112–118 http://doi.org/10.11911/syztjs.2022018

数据驱动的页岩油水平井压裂施工参数智能优化研究

Research on Data-Driven Intelligent Optimization of Fracturing Treatment Parameters for Shale Oil Horizontal Wells

石油钻探技术. 2023, 51(5): 78–87 http://doi.org/10.11911/syztjs.2023087

扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024080

引用格式：张喜民. 基于遗传算法的丛式井平台部署优化研究 [J]. 石油钻探技术，2024，52(4)：44-50.

ZHANG Ximin. Optimization study of cluster well platform deployment based on genetic algorithm [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 44-50.

基于遗传算法的丛式井平台部署优化研究

张喜民

（中石化胜利石油工程有限公司，山东东营 257001）

摘　要：丛式井钻井平台位置优化是油田开发前需要关注的重要问题，在应用枚举法、动态聚类法等方法进行平台位置优化时，要依靠经验或方法本身存在一定局限性。为此，以横向靶前位移最小和总投资费用最小为目标，建立了钻完井费用模型、采油工程费用模型、地面建设费用模型和维护费用模型的平台总投资规划模型，采用双权值法对平台位置和靶点坐标进行优化分配，并基于 Python 语言的遗传算法进行平台位置规划部署。应用大庆油田某区块 44 个靶点的坐标数据，进行了平台位置优化设计，结果表明，以横向靶前位移最小为优选目标的平台总投资规划模型，可以快速地优化钻井平台位置，给出平台位置范围和靶点分配，并可以根据不同地形选取合适的平台位置和靶点坐标，人为因素影响较小，可以很好地解决丛式井平台部署问题，对其他区块平台部署有很好的借鉴意义。

关键词：丛式井；钻井平台；位置优选；靶前位移；投资规划；遗传算法

中图分类号：TE32+9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001–0890(2024)04–0044–07

Optimization Study of Cluster Well Platform Deployment Based on Genetic Algorithm

ZHANG Ximin

(*Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong,* 257001*, China*)

Abstract: The location optimization of cluster well drilling platforms is an important issue that needs to be focused on before oilfield development. Relying on experience or methods themselves has certain limitations when the enumeration method and dynamic clustering method are used to optimize platform location. To this end, the total platform investment planning model was established with the goal of minimum lateral displacement in front of target points and minimum total investment cost, including the drilling and completion cost model, production engineering cost model, surface construction cost model, and maintenance cost model. The platform location and target point coordinates were optimally allocated by using double weight method. A genetic algorithm based on Python language was used to plan the platform location deployment. The coordinate data of 44 target points in a block of Daqing Oilfield was used for platform location optimization design. The results show that the total platform investment planning model with the minimum lateral displacement in front of target points as the optimal objective can optimize the location of the drilling platform quickly, provide the platform location range, and allocate the target points. It can also select the appropriate platform location and target point coordinates according to different terrains with less influence by human factors, and can solve the problem of cluster well platform deployment. It has a good reference for platform deployment of other blocks.

Key words: cluster well; drilling platform; location optimization; displacement in front of target points; investment planning; genetic algorithm

丛式井技术具有节省投资、节约地面空间和便于集中管理等优点，是提高油田开发效益的重要技术手段[1–2]。丛式井钻井平台“多井集中”的特点[3–4]，使平台位置的优化问题成为油田开发前需要重点考虑的问题，国内众多学者对此开展了大量研究。葛云华等人[5]应用枚举法进行平台位置的预选择，建

收稿日期：2024-05-13；**改回日期：**2024-06-30。

作者简介：张喜民(1982—)，男，山东冠县人，2005 年毕业于长江大学石油工程专业，2016 年获长江大学石油钻井工艺专业硕士学位，高级工程师，主要从事石油工程技术研究与管理工作。E-mail: hhzjzxm@126.com。

基金项目：油气资源与工程全国重点实验室开放基金“页岩油储层井壁失稳机理及对策技术研究”（编号：PRE/open-2307）资助。

立了基于油田建设总投资最小的平台设置规划模型；李文飞等人[6]使用遗传算法建立了以控制靶点位移之和最小、井眼长度之和最小或钻井成本之和最小为目标的钻井平台位置优选模型；史玉才等人[7]使用动态聚类分析法建立了以靶点水平位移平方和最小为目标的钻井平台位置优选模型；M.V.O. CAMARA 等人[8]提出了基于非支配排序遗传算法的多目标和多层次钻井平台选址优选方法；E.H. MOREL[9]研究了丛式井平台布局优化问题。由于枚举法大多依靠经验，k-means 动态聚类法的聚类结果受初始凝聚点影响大，仍存在局限性。因此，基于前人研究成果[10]，采用遗传算法[11–14]建立以横向靶前位移最小为目标的平台总投资规划模型，用双权值靶点分配算法进行平台位置优选和井位与平台隶属关系的确认，从而实现平台位置优化部署、钻完井费用局部最优和总投资费用全局最优的目标。

1　平台总投资规划模型的建立

根据不同地质条件下的靶点分布情况，将平台位置和平台数量作为未知条件和应求条件，以横向靶前位移最小为目标，控制钻井成本局部最优，建立了总投资费用优化模型。总投资费用主要有钻完井费用、地面建设费用、采油工程费用和维护费用 4 部分。随着区块内部署的平台数量增多，总投资费用中地面建设费用和采油工程费用升高，但横向靶前位移随之减小，钻完井费用和维护费用就逐渐降低。因此，存在使总投资费用达到最少的最优平台数量。

1.1　钻完井费用优化模型

单井钻完井费用与井眼轨迹和井类型有关，为此，假设井类型已知，则单井钻完井费用与水平段长度、横向靶前位移相关。在调研丛式井数量、位置和建设投资之间内在规律的基础上，加入大量类似区块已钻井成本资料进行多元回归分析[5]，建立区块内钻井平台的钻完井费用模型。

单井钻完井费用可以表示为：

$$f_{1i} = f(\delta, L) \tag{1}$$

$$L = \sqrt{(x_{Bi} - x_{Ai})^2 + (y_{Bi} - y_{Ai})^2} \tag{2}$$

$$\delta = \frac{|(x_{Bi} - x_{Ai})Y_j - (y_{Bi} - y_{Ai})X_j + y_{Bi}x_{Ai} - y_{Ai}x_{Bi}|}{L} \tag{3}$$

式中：f_{1i} 为单井的钻完井费用，万元；L 为水平段长度，m；(x_{Ai}, y_{Ai})、(x_{Bi}, y_{Bi})分别为第 i 口井靶点 A 和 B 的位置坐标，m；δ为横向靶前位移，m；(X_j, Y_j)为第 j 座平台的位置坐标，m。

区块内平台的钻完井费用模型可表示为：

$$f_1 = \sum_{j=1}^{n_p}\sum_{i=1}^{n_w}\alpha_{ij}f_{1i} \tag{4}$$

式中：f_1 为区块内所有平台的钻完井费用，万元；n_w 为井数量，口；n_p 为平台数量，座；α_{ij} 为井与平台之间的隶属关系，当第 i 口井选择第 j 座平台时，α_{ij}=1，若不选择该平台时，α_{ij}=0。

1.2　采油工程费用模型

丛式井采油工程费用与开发方式、布井模式及平台所钻井数量相关。在开发方式及布井模式一定的条件下，随着平台所钻井数量增多，采油工程费用也呈指数增加。调研涪陵工区采油工程费用与平台所钻井数量的相关资料[15]，通过多元回归分析，得到中低渗油藏单平台采油工程费用模型：

$$f_{2j} = an_{jw}^2 + bn_{jw} + c \tag{5}$$

式中：f_{2j} 为单平台采油工程费用，万元；n_{jw} 为第 j 座平台所钻井数量，口；a, b 和 c 分别为多元回归系数。

区块内总平台的采油工程费用可表示为：

$$f_2 = \sum_{j=1}^{n_p}\beta_j f_{2j} \tag{6}$$

式中：f_2 为总平台的采油工程费用，万元；β_j 与第 j 座平台是否被选中有关，若被选中，则 β_j=1，若没有被选中，则 β_j=0。

1.3　地面建设费用模型

地面建设费用主要包括平台建设费用、油气集输系统费用、道路供电费用及征地费用等，笔者仅考虑了平台建设费用和征地费用。地面建设费用与区块内所布置的平台和井数量密切相关，平台越少，各平台的所钻井数量就越多，单井的占地面积就越少，平台的建设及征地费用就越少[16]。征地费用主要与布井方式相关，而布井方式主要受地形和渗透率影响[17]，主要有“一字形”、双排或多排、环状和方形等方式。为减少单井占地面积，当平台所钻井数量小于 5 口时，选择单排布井；大于等于 5 口井时，选择双排布井[15]。

一般情况下，单平台的地面建设费用与平台所钻井数量呈线性关系，根据平台所钻井数量不同，存在单排布井和双排布井 2 种布井方式。

单排布井模式下单平台地面建设费用可表示为：

$$f_{3j}^1 = \sum_{j=1}^{n_p}\beta_j\left\{(a_j + b_j)\left[c_1 + d_1(n_{jw} - 1)\right]\right\} \tag{7}$$

式中：f_{3j} 为单平台的地面建设费用，万元；a_j 为第 j 座平台单位面积建设费用，万元/m^2；b_j 为第 j 座平台单位面积征地费用，万元/m^2；c_1 为单排布井模式下的平台占地面积，m^2；d_1 为单排布井模式下，每增加 1 口井所增加的平台面积，m^2。

双排布井模式下单平台地面建设费用可表示为：

$$f_{3j}^2 = \sum_{j=1}^{n_p} \beta_j \{(a_j + b_j)[c_2 + d_2(n_{jw} - 1)]\} \tag{8}$$

式中：c_2 为双排布井模式下平台的占地面积，m^2；d_2 为双排布井模式下每增加 1 口井所增加的平台面积，m^2。

这样，区块内总平台地面建设费用可以表示为：

$$f_3 = \sum_{j=1}^{n_p} f_{3j} \tag{9}$$

式中：f_3 为区块内总平台地面建设费用，万元。

1.4　维护费用模型

在储层埋深保持不变情况下，平台所钻井数量越多，横向靶前位移越大。平台的维护费用与横向靶前位移相关，横向靶前位移越大，维护费用越高，因此认为平台的维护费用与横向靶前位移呈线性关系。根据当地维护费用资料统计回归所得到的经验常数，引入维护费用系数，则平台维护费用可表示为：

$$f_4 = g \sum_{i=1}^{n_w} \delta_i \tag{10}$$

式中：f_4 为平台的维护费用，万元；g 为平台的维护费用系数，万元/m；δ_i 为第 i 口井的横向靶前位移，m。

1.5　平台总投资费用模型

将钻完井费用、地面建设费用、采油工程费用和维护费用的总和（即平台总投资费用）最小作为优选平台位置的目标函数，建立了丛式井平台位置优化数学模型：

$$F = \min(f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \tag{11}$$

约束条件为：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n_p} \alpha_{ij} = 1 \qquad i = 1,2,\ldots,n_w \\ \sum_{j=1}^{n_w} \alpha_{ij} \leqslant M_j \qquad i = 1,2,\ldots,n_p \\ n_p \leqslant n_{p\max} \\ \left\lceil \dfrac{n_w}{M_j} \right\rceil \leqslant n_p \leqslant n_{p\max} \end{cases} \tag{12}$$

式中：F 为平台总投资费用，万元；M_j 为第 j 座平台的最大容纳井数量，口；$n_{p\max}$ 为允许建设的最大平台数量，座。

2　钻井平台位置优化

2.1　基本原理

当钻井平台数量及各井之间的隶属关系均未知时，属于多重数学规划问题[18–19]，选用遗传算法解决。遗传算法实质上是一种根据某一随机产生的或是特定的初始解集进行选择、交叉、变异等操作的迭代算法，基于适者生存和优胜劣汰的原则，通过淘汰适应度较低的个体，不断迭代并保留适应度较高的个体，无限逼近最优解[20–22]。基于遗传算法的钻井平台位置优化流程如图 1 所示。

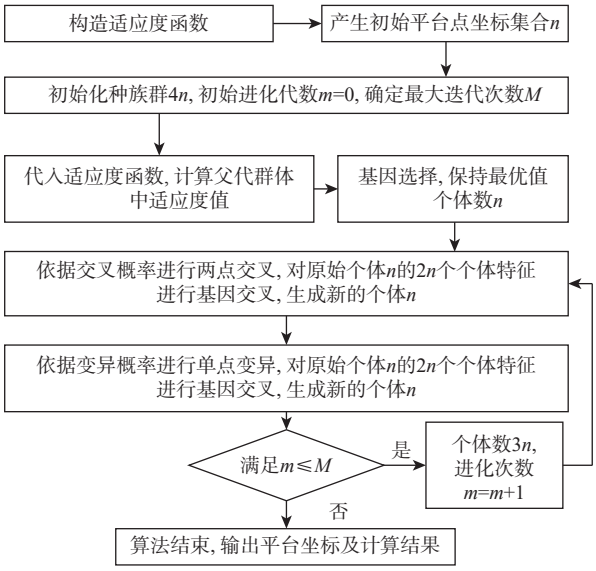

图 1　基于遗传算法的钻井平台优选流程

Fig.1　Optimization process of drilling platform based on genetic algorithm

2.2　优化方法

2.2.1　构造适应度函数

根据总投资费用模型中的约束条件，构造以总投资费用为目标函数的适应度函数，可表示为：

$$F = \sum_{j=1}^{n_p} \sum_{i=1}^{n_w} \alpha_{ij} f_{1i} + \sum_{j=1}^{n_p} \beta_j (f_{2j} + f_{3j}) + g \sum_{i=1}^{n_w} \delta_i \tag{13}$$

根据目标函数，平台和所钻井靶点的优化分配和替换方法为：

1）当平台位置未知时，随机生成 n 座平台坐标 (X_1, Y_1)，(X_2, Y_2)，…，(X_n, Y_n)；已知 m 口井靶点坐标为 (x_1, y_1)，(x_2, y_2)，…，(x_m, y_m)。此时平台坐标和靶点坐标均已知。

2）以横向靶前位移为控制因素，得出第 i 口井靶点坐标与 n 座平台坐标之间的横向靶前位移 δ_i，记为 δ_1 (δ_{11}, δ_{12}, …, δ_{1n}), …, δ_m (δ_{m1}, δ_{m2}, …, δ_{mn})。以距离 δ_i 的最小值 $\delta_{i\min}=\min\{\delta_{i1}, \delta_{i2}, \ldots, \delta_{in}\}$ 为基础，得出第 i 口井靶点距离差值 $\delta_{fi}(\delta_{f11}, \delta_{f12}, \ldots, \delta_{f1n})$，即为 $\delta_{f1}(\delta_{f11}, \delta_{f12}, \ldots, \delta_{f1n})$, $\delta_{f2}(\delta_{f21}, \delta_{f22}, \ldots, \delta_{f2n})$, …, $\delta_{fm}(\delta_{fm1}, \delta_{fm2}, \ldots, \delta_{fmn})$。其中 δ_{fij} 的计算公式为：

$$\delta_{fij} = \delta_{ij} - \delta_{i\min} \quad j = 1,2,\ldots,n \tag{14}$$

3）每个平台多口井不同横向靶前位移靶点的连接顺序不同，则平台总投资费用不同，因此需要对其进行优化。对每口井靶点的横向靶前位移 δ_{fi} 设置对应的权值 D_i，用来标记靶点的连接优先级，优先级越大的连接顺序越靠前。D_i 的计算公式为：

$$\delta_{fi\max} = \max\{\delta_{fi1}, \delta_{fi2}, \ldots, \delta_{fin}\} \tag{15}$$

$$D_i = (\delta_{fi\max} - \delta_{fi1}) + \ldots + (\delta_{fi\max} - \delta_{fin}) \tag{16}$$

4）当某个平台的靶点连接数达到最大时，可能存在某一个靶点，与该平台的连接靶点中的任何一个替换后，能降低方案的总费用，因而对每一个靶点的横向靶前位移 δ_{fi} 设置相应的权值 F_i，用来表示替换时的优先级，优先级值较高的可替换优先级值较低的。F_i 计算公式为：

$$F_i = \delta_{fi1}^2 + \delta_{fi2}^2 + \ldots + \delta_{fin}^2 \tag{17}$$

2.2.2　初始化种群及基因选择

在选定适应度函数的基础上，进行初始化种群及基因选择，当个体数设定为 n 时，初始化种群数为 $4n$。根据适应度函数，保留适应度值最优的 n 个个体，参与下一步基因交叉和变异。对于钻井平台优化问题，根据井和平台数量，假设某个区块的井数量为 25 口，则对应的初始化种群规模为 100；进化代数较小时存在精确度偏差较大的问题，故设置初始进化代数 m 为 0，最大进化代数为 500。

2.2.3　基因交叉与变异

已知待钻井数量 n_w 和预选平台数量 n_p，将钻井平台位置优选问题转化为求解所钻井与平台之间隶属关系为核心的问题。将平台位置的横纵坐标作为个体特征，个体数为 n 时，个体特征数量为 $2n$。在基因交叉操作时，对原始 n 个个体进行两两交叉生成新的 n 个个体，此时个体数为 $2n$；在基因变异操作时，对原始 n 个个体进行单点自我变异生成新的 n 个个体，此时个体数为 $3n$。随后进行下一轮的迭代，直至迭代次数达到 500 为止，再取出最优个体作为最终方案。

3　应用实例

根据遗传算法，以大庆油田某区块 44 个靶点的坐标（如图 2 所示）为例，使用 Python 语言编制了水平段长度为 800, 1 000, 1 200 和 1 400 m 时的平台与靶点之间的拓扑优选程序，根据平台总投资费用模型（式（11））计算出不同长度水平段的钻完井费用、地面建设费用、采油工程费用、维护费用和总投资费用，如图 3 所示。

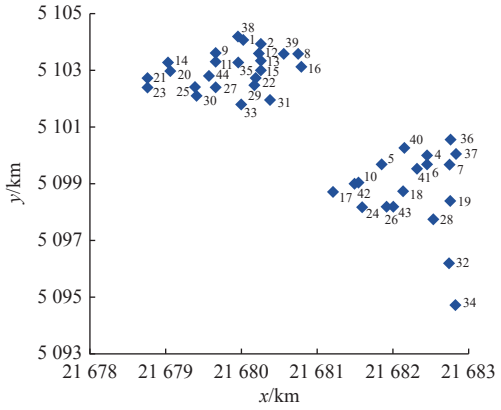

图 2　大庆油田某区块 44 个靶点的坐标

Fig.2　44 target point coordinates of a certain block in Daqing Oilfield

从图 3 可以看出，在平台数量相同条件下，随水平段长度增加，各项费用均在逐渐增加，在平台数量为 6 和 7 座时总投资费用达到最优，可见水平段长度是影响钻完井费用和总投资费用的主要因素。另外，钻完井费用在总投资费用中占比最大，因而在优化平台部署时，应首先考虑优化水平段长度。

从图 3 还可以看出，随着平台数量增加，钻完井费用和维护费用逐渐降低，采油工程费用和地面建设费用逐渐升高。总体而言，总投资费用随平台数量增加呈现先降低后升高的趋势。这说明随平台数量增加，可以减少很大一部分的钻完井费用，由式（10）可知，随着横向靶前位移减小，维护费用也逐渐减少；但同时会因平台占地面积增加而导致地面建设费用和采油工程费用逐渐增大。因此，确定水平段长度后应选择合适的平台数量，使各部分费用达到局部最优，总费用实现整体最优。

根据图 3 的计算结果，可以优选出不同长度水平段下区块平台数量的优化设计方案，如图 4 所示。水平段长度增加，会影响部分平台和靶点的规划部署，但最优平台数量保持在一定范围内。

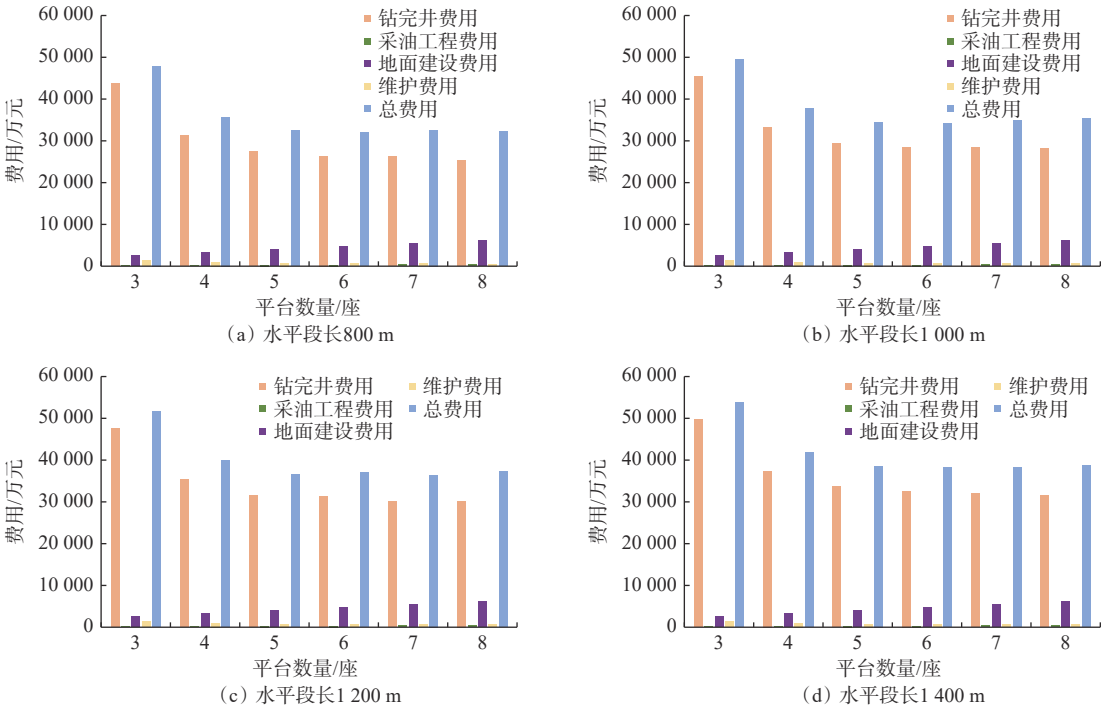

图 3　不同长度水平段下丛式井平台各项工程费用计算结果

Fig.3　Calculation results of various engineering costs for cluster well platforms with different horizontal segment lengths

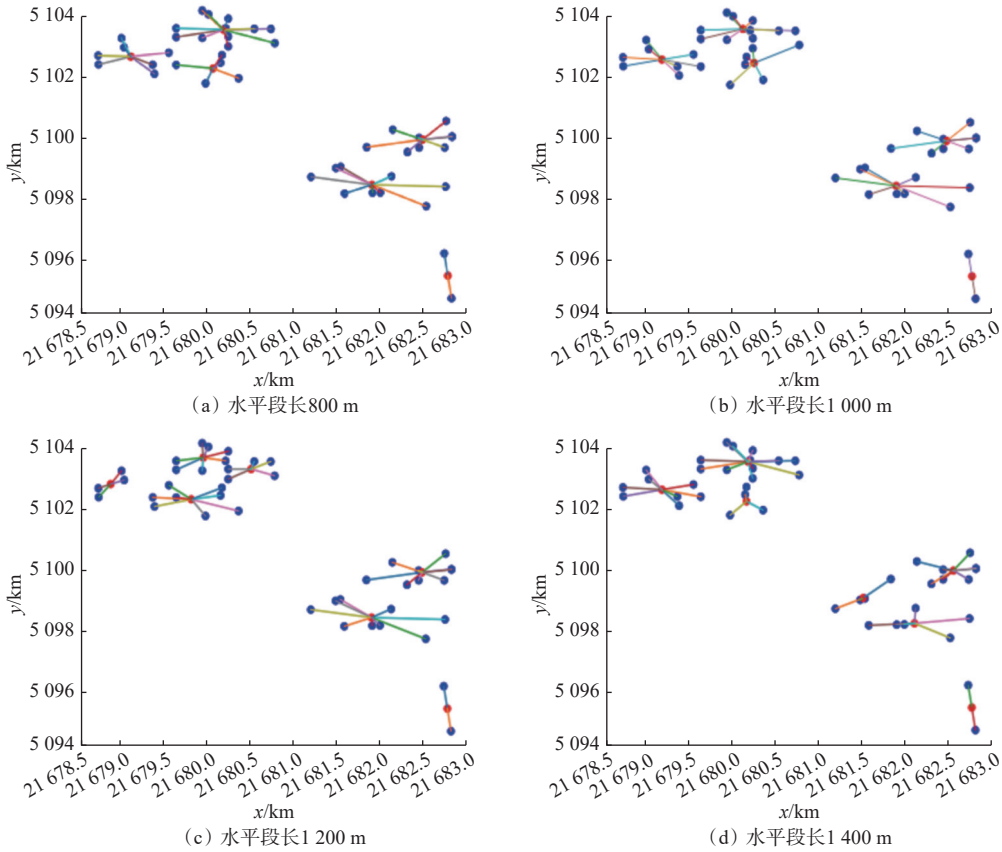

图 4　不同长度水平段下平台数量优化设计方案

Fig.4　Optimization design scheme for the number of platforms corresponding with different horizontal segment lengths

由图 4 可知，该区块最优平台数量为 6 和 7 座，由此可根据编写的拓扑优选程序对平台和靶点进行快速优化分配，并确定丛式井平台数量的取值范围和可能分配给该平台的靶点，可优选出适合不同地形时的平台位置和靶点隶属关系，从而优化钻井平台位置。平台坐标范围及靶点分配优化结果见表 1。

表 1　基于遗传算法的平台坐标范围及靶点分配优化结果

Table 1　Optimization results of platform coordinate range and target point allocation based on genetic algorithm

平台序号	平台坐标范围		分配该平台的靶点序号
	x/m	y/m	
P1	21 678 901～21 679 207	5 102 635～5 102 844	14, 20, 21, 23, 25, 27, 30, 44
P2	21 679 830～21 680 184	5 102 248～5 103 646	15, 16, 22, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 44
P3	21 679 968～21 680 520	5 102 522～5 103 715	1, 2, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 35, 38, 39
P4	21 680 520～21 682 122	5 098 239～5 099 067	5, 10, 17, 18, 19, 24, 26, 28, 42, 43
P5	21 682 492～21 682 570	5 099 946～5 099 971	3, 4, 5, 6, 7, 36, 37, 40, 41
P6	21 682 783	5 095 467	32, 34

利用枚举法的平台位置与靶点隶属关系的优选结果见表 2。根据平台总投资费用计算模型（式（11））对遗传算法和枚举法优选出的平台位置与靶点隶属关系进行总投资费用计算，结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，与枚举法相比，遗传算法优选结果的总投资费用更低，且可以根据不同地形选取合适的平台位置和靶点坐标，实现以最优平台数量和最低总投资费用进行丛式井平台部署。

表 2　基于枚举法的平台位置与靶点隶属关系优选结果

Table 2　Optimization results of platform location and target point membership relationship based on enumeration method

平台序号	分配该平台的靶点序号
P1	14, 21, 23
P2	20, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 44
P3	1, 2, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 22, 35, 38, 39
P4	5, 17, 42
P5	12, 18, 19, 24, 26, 28, 43
P6	3, 4, 6, 7, 36, 37, 40, 41
P7	32, 34

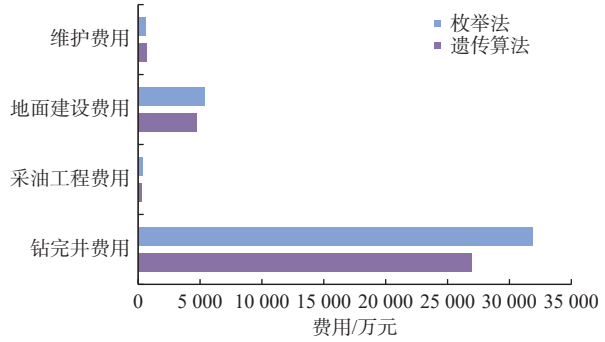

图 5　基于遗传算法和枚举法的投资费用计算结果

Fig.5　Calculation results of investment costs based on genetic algorithm and enumeration method

4　结　论

1）在平台总投资规划模型中，总投资费用随平台数量增多呈现先逐渐降低后逐渐升高的趋势，存在一个总投资费用最少的平台数量。随着平台数量增加，钻完井费用和维护费用逐渐降低，采油工程费用和地面建设费用逐渐升高，并且钻完井费用在总投资费用中占比最大，水平段长度和平台数量是影响总投资费用的主要因素。

2）计算实例表明，与枚举法相比，遗传算法优选结果的总投资费用更低。

3）笔者所建立的平台总投资规划模型可以很好地解决丛式井平台部署问题，对其他区块平台部署也有很好的借鉴意义，但因考虑因素有所不同，实际钻井中还需要对其影响因素进行进一步研究分析。

参　考　文　献

References

[1] 田启忠, 戴荣东, 王继强, 等. 胜利油田页岩油丛式井提速提效钻井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(4): 404–409.
TIAN Qizhong, DAI Rongdong, WANG Jiqiang, et al. An efficient and fast shale oil cluster well drilling technology for Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(4): 404–409.

[2] 杨泽宁. 胜利油田滨 17 丛式井组优快钻井技术 [J]. 西部探矿工程, 2020, 32(12): 66–68.
YANG Zening. Optimal and rapid drilling technology of 17 cluster well groups in Shengli Oilfield Bin[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(12): 66–68.

[3] 梁珀, 张磊. NH 区块丛式井高效开发模式探索及实践 [J]. 复杂油气藏, 2020, 13(4): 69–73.

LIANG Po, ZHANG Lei. Exploration and practice of high-efficiency development model of cluster wells in NH Block[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2020, 13(4): 69–73.

[4] 王瑞泉，白晓东. 提高低渗、低产油田开发建设效益对策分析 [J]. 油气田地面工程，2006，25(4)：1–3.
WANG Ruiquan, BAI Xiaodong. Analysis of countermeasures to improve the benefits of development and construction of low-permeability and low-yield oilfields[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2006, 25(4): 1–3.

[5] 葛云华，鄢爱民，高永荣，等. 丛式水平井钻井平台规划 [J]. 石油勘探与开发，2005，32(5)：94–100.
GE Yunhua, YAN Aimin, GAO Yongrong, et al. Drilling pad optimization for oilfield development by cluster horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 94–100.

[6] 李文飞，朱宽亮，管志川，等. 大型丛式井组平台位置优化方法 [J]. 石油学报，2011，32(1)：162–166.
LI Wenfei, ZHU Kuanliang, GUAN Zhichuan, et al. Location optimization for the drilling platform of large-scale cluster wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 162–166.

[7] 史玉才，管志川，陈秋炎，等. 钻井平台位置优选方法研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2007，31(5)：44–47.
SHI Yucai, GUAN Zhichuan, CHEN Qiuyan, et al. Location optimization method for drilling platform[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007, 31(5): 44–47.

[8] CAMARA M V O, RIBEIRO G M, TOSTA M C R. A pareto optimal study for the multi-objective oil platform location problem with NSGA-II[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 169: 258–268.

[9] MOREL E H. Optimization of gas field development[R]. SPE19033, 1998.

[10] 王赞，王晓琪，陈立强，等. 丛式井平台位置优选评价研究与应用 [J]. 北京石油化工学院学报，2022，30(1)：45–49.
WANG Zan, WANG Xiaoqi, CHEN Liqiang, et al. Research and application of location optimization evaluation of cluster well platform[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022, 30(1): 45–49.

[11] 张磊，谢涛，王晓鹏，等. 基于成本最低的海上丛式井平台位置优选新方法 [J]. 石油机械，2019，47(1)：52–57.
ZHANG Lei, XIE Tao, WANG Xiaopeng, et al. A new method for offshore cluster platform location selection based on the minimum cost[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(1): 52–57.

[12] ABRAMOV A. 丛式井平台设计及井丛分组优化 [J]. 石油勘探与开发，2019，46(3)：588–593.
ABRAMOV A. Optimization of well pad design and drilling-well clustering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 588–593.

[13] 王志月，高德利，刁斌斌，等. 考虑“井工厂”学习效应的平台位置优化方法 [J]. 天然气工业，2018，38(1)：102–108.
WANG Zhiyue, GAO Deli, DIAO Binbin, et al. Optimization of platform positioning considering the learning effect in the “well factory” mode[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 102–108.

[14] 顾岳，高德利，杨进，等. 页岩气大型丛式井三维轨道优化设计模型 [J]. 钻采工艺，2020，43(6)：13–16.
GU Yue, GAO Deli, YANG Jin, et al. Optimal design model of 3-D wellbore trajectory for large-scale cluster wells for shale gas[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(6): 13–16.

[15] 臧艳彬，张金成，赵明琨，等. 涪陵页岩气田“井工厂”技术经济性评价 [J]. 石油钻探技术，2016，44(6)：30–35.
ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, ZHAO Mingkun, et al. Economic performance assessments of multi-well pad drilling technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(6): 30–35.

[16] 王敏生，光新军. 页岩气“井工厂”开发关键技术 [J]. 钻采工艺，2013，36(5)：1–4.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Key technologies of shale gas development by “well factory”[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5): 1–4.

[17] 李恒清. 低渗透油藏开发存在的问题及合理布井方式研究 [J]. 内蒙古石油化工，2019，45(8)：121–122.
LI Hengqing. Research on the problems existing in the development of low permeability reservoir and reasonable well deployment methods[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2019, 45(8): 121–122.

[18] 尚明忠，盖英杰，李树荣，等. 油田开发规划非线性多目标优化模型研究 [J]. 石油钻探技术，2003，31(4)：59–61.
SHANG Mingzhong, GE Yingjie, LI Shurong, et al. Study on nonlinear multiple objects optimal model for oil field development programming[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(4): 59–61.

[19] 李婷. 基于随机模拟的油田开发规划二步决策优选方法 [J]. 世界石油工业，2022，29(5)：39–45.
LI Ting. Two-step decision optimization method of oilfield development planning based on stochastic simulation[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(5): 39–45.

[20] 程元栋，杨齐威，闫俊. 基于混合自适应精英遗传算法的路径规划研究 [J]. 湖北民族大学学报(自然科学版)，2023，41(1)：51–57.
CHENG Yuandong, YANG Qiwei, YAN Jun. Research on path planning based on hybrid adaptive elite genetic algorithm[J]. Journal of Hubei Minzu University(Natural Science Edition), 2023, 41(1): 51–57.

[21] 方青，潘晓东，吴中. 基于遗传算法的城市停车换乘设施选址模型研究 [J]. 中国科技论文在线，2010，5(10)：763–766.
FANG Qing, PAN Xiaodong, WU Zhong. Study on the model of location of urban park and ride lots based on genetic algorithm[J]. Sciencepaper Online, 2010, 5(10): 763–766.

[22] 王磊，张辉，柯珂，等. 基于遗传算法的深水无隔水管钻井液举升系统锚泊定位方案优化 [J]. 中国海上油气，2022，34(6)：142–148.
WANG Lei, ZHANG Hui, KE Ke, et al. Optimization of deepwater riser free drilling fluid lifting system mooring positioning scheme based on genetic algorithm[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 142–148.

[编辑　陈会年]