https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.459



缝洞型油藏井间三维连通路径多目标搜索算法设计

张振坤1,张冬梅1*,康志江2,姜文斌1,刘坤岩2

中国地质大学计算机学院,湖北武汉 430074
 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083

摘 要:深层海相碳酸盐岩油气藏储集体类型复杂多样,非均质性强,井间连通关系评价困难.针对传统静动态方法主观性强、多解等问题,基于三层结构设计,采用地震多属性数据刻画不同类型储集空间,提出改进A*算法搜索符合地质构造的井间连通路径,根据优化目标研究自适应交叉变异概率改进NSGA Ⅲ算法自动获取井间三维沟通路径,细致刻画静态连通情况. 以塔河油田 S80单元典型井组为研究对象,实验结果表明改进优化算法能有效提升多目标算法的全局搜索能力,自动搜索路径与地震资料分析、示踪剂测试情况基本吻合,能较好反映井间不同尺度缝洞空间配置关系,为缝洞型油藏注水开发阶段指导工作制度调整、提高采收率提供技术支撑.

关键词:缝洞型油藏;改进A*算法;自适应交叉变异概率;NSGA Ⅲ;连通路径;石油地质.
中图分类号: P618.13
文章编号: 1000-2383(2023)08-3031-13
收稿日期:2022-11-29

Multi-Objective Search for Three-Dimensional Connectivity Paths between Wells in Fractured-Vuggy Reservoirs

Zhang Zhenkun¹, Zhang Dongmei^{1*}, Kang Zhijiang², Jiang Wenbin¹, Liu Kunyan²

School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract: The deep marine carbonate reservoirs have complex reservoir types and strong heterogeneity, so it's difficult to evaluate the well connectivity. This paper designs a three-layer structure to address the subjectivity and multiple solutions problems about traditional static and dynamic inter-well connected evaluation methods. The improved A* algorithm is proposed to search for the inter-well connected paths by geological formations. The improved NSGA III algorithm with self-applicable cross-variance probability according to the optimization objective is proposed to obtain three-dimensional multi-connected paths automatically which can carefully characterize the static connectivity. The experiment takes the S80 unit typical well group as the object in the TAHE oilfield. The results show that the adaptive cross-variance probability can effectively improve the multi-objective algorithm global search capability . The automatic search paths match with the seismic multi-attribute data analysis and tracer testing. Therefore, the algorithm can better reflect the spatial configuration relationship of fractures and cavities at different scales between wells. Furthermore, it can also provide technical support for adjusting the work system and improving the recovery in the field development of fractured-vuggy reservoirs in the water-injecting development stage.

Key words: fractured-vuggy reservoirs; improved A* algorithm; adaptive cross-variance probability; NSGA Ⅲ; connected paths; petroleum geology.

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(No. U19B6003);国家重大科技专项(No. 2016ZX05014-003-003)

作者简介:张振坤(1998-),男,硕士研究生,主要从事多目标优化、智慧油田研究. ORCID:0000-0003-4904-260X. E-mail: 1202111251@cug. edu. cn * 通讯作者:张冬梅, ORCID:0000-0002-3377-7022. E-mail: cugzdm@foxmail. com

引用格式:张振坤,张冬梅,康志江,姜文斌,刘坤岩,2023. 缝洞型油藏井间三维连通路径多目标搜索算法设计.地球科学,48(8):3031-3043. **Citation:** Zhang Zhenkun, Zhang Dongmei, Kang Zhijiang, Jiang Wenbin, Liu Kunyan, 2023. Multi-Objective Search for Three-Dimensional Connectivity Paths between Wells in Fractured-Vuggy Reservoirs. *Earth Science*, 48(8):3031-3043.

0 引言

中国油气资源总量中,埋深大于4500m的深 层油气约占40%,大型碳酸盐岩油气藏如塔里木盆 地塔河油田等是主要组成部分和油气勘探的重要 领域(康志江等,2020).受多期构造运动、风化溶 蚀、古水系等地质条件影响,碳酸盐岩缝洞型油藏 储集体空间结构复杂多样,大型洞穴、溶蚀孔洞与 裂缝发育,储层非均质性极强(康玉柱等,2008).井 间连通程度评价是稳油控水、改善水驱开发效果的 基础,明确井间三维连通路径能直观表征不同尺度 的孔缝洞空间配置关系,对指导工作制度调整、提 高采收率意义重大.

传统油藏井间连通评价主要包括静态分析和 动态分析两大类.静态分析多通过构造、测井曲线 分析、地层剖面对比等明确储层连通关系,但判别 效率低、主观性强(Yang et al., 2013);动态分析多 基于生产动态如多元回归模型(Heffer et al., 1997; Albertoni et al., 2002)、电容模型(Yousef, 2006)等 数学方法评价井间连通程度,但设计模型普遍简 单,没有考虑实际地质结构特征,计算结果受频繁 关停井等工作制度影响多解、可靠性差.结合大尺 度数值模拟的 INSIM 模型(赵辉等, 2014)将油藏注 采系统简化表征为井间连通单元,通过模型参数反 演得到传导率和无因次控制体积等连通参数表征 井间连通关系.流线模拟方法(Pollock,1988)基于 地质模型结合流线追踪方法得到流体曲线,侵入逾 渗模拟(Meakin et al., 2000)结合逾渗理论模拟油气 运移过程,但在复杂地质条件下对断面和不整合面 等刻画不够细致.上述数值模拟及历史拟合过程计 算复杂,耗时较长.

静态连通是连通性评价的基础,深层碳酸盐岩 多重介质储层非均质性强,不同尺度的溶蚀孔洞界 定困难.研究基于地震多属性数据描述不同尺度储 集空间分布特征,设计智能搜索策略自动搜索井间 大尺度缝洞沟通路径,以直观刻画井间静态连通通 道,其中设计合适的搜索策略是研究的关键.经典 路径搜索算法包括非启发式和启发式算法两大类, 非启发式算法有经典的Dijiska算法、人工势场法、 道路图法等,但鲁棒性差、精度低;启发式算法能有 效结合实际应用场景提升搜索效率,如A*及改进算 法被广泛应用于不同领域的路径搜索及规划问题 (王洪斌等,2019; 葛晓琳等,2021; 鲍久圣等, 2022),但难以有效解决搜索过程中存在的多分支 闭环问题.传统路径搜索算法多以最短路径为目 标,每次优化只能找到单条路径,不符合实际复杂 油藏场景多样化需求.由于多目标优化算法能够得 到一组较优的非支配解,在自动导引车(郭兴海等, 2020)、船舶(曹旺等,2021)、无人机(樊娇等,2022) 等领域的路径搜索得到越来越广泛应用.但用多目 标优化算法自动搜索连通通道,具有多模性、不确 定性、计算开销大等问题.

研究基于参考点的快速非支配排序NSGA II 多目标优化算法搜索井间连通路径,针对深层缝洞 型油藏储渗空间类型多样、连通路径孔缝洞空间配 置关系复杂等特点,提出一种新型缝洞型油藏井间 三维连通路径搜索策略.新模型融合地震多属性刻 画不同类型的储集体,建立反映油藏真实地质构造 特征的评价函数,改进A*最优路径搜索算法,设计 路径连通长度和体积的优化目标提出自适应交叉 变异算子的NSGA III改进算法,快速搜索反映实际 储层的井间连通路径.研究对埋深大于5000 m的 塔河油田 S80 单元典型井组搜索井间三维连通通 道,自动寻优结果的地质特征与地震多属性数据、 示踪剂测试结果基本吻合,能较好刻画井间连通关 系,以进一步刻画缝洞空间配置,指导深层缝洞型 油藏注采优化决策.

1 井间三维连通路径搜索模型

1.1 问题描述

深层碳酸盐岩多重介质油藏储层空间分布复杂,发育不同尺度的溶蚀孔洞和裂缝,包含裂缝、溶蚀孔洞和低孔隙度低渗透率的基岩等(李阳,2013).流体以裂缝流动为主,储集在溶蚀孔洞中,通过孔隙与裂缝渗流,见图1.不同尺度裂缝的流动能力不同,大尺度裂缝压力梯度和流速比较高、压力差异大,为井间连通的主要方式,地下流体往往优先沿大裂缝方向流动(马安来等,2020);除裂缝外溶洞系统也是缝洞型油藏重要的沟通通道和有效储集空间.

缝洞型油藏井间连通路径是三维地质空间搜 索到的由裂缝或溶洞沟通的通道.其中不同类型储 集体分别采用三维地震多属性数据刻画,结合井轨 迹井底坐标自动追踪不同尺度裂缝、溶洞连通的路 径,刻画路径所属储集体的三维展布特征,如图2 所示.



图 2 井间连通路径示意图 Fig.2 Diagram of inter-well connection paths

1.2 缝洞型油藏三维搜索空间建模

深层碳酸盐岩缝洞型油藏地质结构复杂,为简 化搜索问题,将深度域地震多属性数据映射到三维 空间并栅格划分.其中相干属性主要刻画断层展布 特征(Marfurt *et al.*,1998;韩革华等,2006);振幅属 性反映储层厚度、孔隙度及岩性的变化用于检测溶 蚀孔洞,刻画储集空间变化特征(刘立峰等,2009); 曲率属性反映构造作用下地层弯曲程度,可描述中 小尺度裂缝与微缝隙(李小波等,2014).各栅格点 分别采用均方根振幅、相干、曲率多属性描述,通过 融合地震多属性刻画地质特征如图3所示.

基于三维地震数据体构建搜索空间,但网格点 间连通与否由相干、振幅、曲率属性阈值及属性权 重参数共同决定,搜索空间相邻网格间的连通关系 概念图如图4所示.若当前节点用黄色网格表示,蓝 色网格为相邻且连通节点,用浅蓝表示裂缝连通包 括大尺度裂缝与微裂缝沟通,深蓝表示溶洞连通, 灰色网格表示相邻但不连通的节点即基质部分,在



图 3 多重介质油藏地质模型 Fig.3 Multi-media reservoir geological model



图 4 相邻单元连通结构 Fig.4 Adjacent unit connectivity

可行搜索空间设计算法自动搜索连通路径.

2 分层多目标搜索井间三维连通路径

2.1 连通路径多层搜索策略框架

为实现深层缝洞型油藏井间三维连通路径寻 优,基于分层多目标寻优思路将整个搜索问题划分 为3个层面的子问题:第一层是对地震体数据空间 建模,将多地震属性作为储层物理空间并栅格化, 通过地震属性阈值划分为可行空间(如溶洞沟通或 裂缝沟通)与非可行空间(如基质),构建融合地震 多属性特征的搜索空间;第二层是在设定搜索空间 采用改进A*算法寻找全局最优路径,融合溶洞、裂 缝地质特征设计评价函数,构建环路判断解决多分 支闭环问题;第三层在改进A*算法搜索路径策略研 究基础上,以连通路径长度和流通体积为各优化目 标,结合问题设计自适应交叉变异算子优化各地震 属性阈值及权重系数,搜索吻合实际地质构造特征 的多条井间连通路径.具体搜索策略框架设计如图





5所示:

2.2 融合地震多属性连通路径改进A*搜索算法

A*算法是Hart等提出的启发式算法(Hart et al.,1968)基本思想是构建评价函数,从初始节点开 始在周围节点中不断选择拥有最小路径估计代价 的节点向外扩展搜索直至终止节点,其中评价函数 设计是算法研究关键.基于相邻且连通节点,研究 优先考虑主干断裂、主要次级断裂、岩溶管道、暗河 等的流体流动方向,融合地震多属性构造真实代价 函数,采用曼哈顿距离构造预估代价函数,结合预 估损失值明确搜索策略,使评价函数设计更符合油 藏地质构造特征.

定义1: 评价函数*F*(*n*) *F*(*n*)是起始节点经待扩展 节点*n*到达目标节点的路径估计代价值.

$$F(n) = G(n) + H(n),$$
式中: $G(n)$ 表示真实代价函数; $H(n)$ 表示预估代价

函数.

定义2:真实代价函数*G*(*n*) *G*(*n*)是从起始节点 到待扩展节点*n*途径地震多属性表征不同类型储集 体的真实代价.

 $G(n) = \lambda CoN_n - \sigma \ln RaN_n - \mu CuN_n$, (2) 式中: $CoN_n RaN_n CuN_n \beta$ 別是结点 n 归一化相干 值、振幅值与曲率值.由于碳酸盐岩基质渗透率较 差,为优先考虑主干断裂、暗河沟通形成岩溶管道 沟通方式,用对数处理均方根振幅数据,引入损失 权重 λ, σ, μ 动态调整多属性融合比例,权重在 0~1 间且权重之和为 1.

定义3:预估代价函数H(n) H(n)是当前节点n到目标节点e路径预估代价.

 $H(n) = |n_x - e_x| + |n_y - e_y| + |n_z - e_z|, \quad (3)$ 式中: $n_x \cdot n_y \cdot n_z$ 是当前节点n的三维坐标, $e_x \cdot e_y \cdot e_z$ 是 目标节点e的三维坐标,节点间的曼哈顿距离为预



估代价.

在井间三维路径搜索过程中会存在大量闭环, 为解决闭环问题,通过进一步计算闭环路段真实代 价评价路径优劣程度以选择较优路径,具体如图6 所示.

定义4:闭环路径代价函数L(n)

$$L(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=pNode}^{LoopNode} G(i),$$
(4)

式中:pNode为闭环开始节点;LoopNode为闭环终止节点;N是闭环中某条路径的节点数.

根据预设栅格相干、振幅及曲率值阈值,评价 各网格点储集空间类型.栅格储集体类型评价函数 *M(n)*定义如下:

定义5: 栅格储集体类型评价函数M(n)

$$M(n) = \begin{cases} 0 \ Ra_n < RaT, Co_n > CoT, Cu_n < CuT \\ 1 \ Ra_n \ge RaT \\ 2 \ Ra_n < RaT, Co_n \le CoT \\ 3 \ Ra_n < RaT, Co_n \ge CoT, Cu_n \ge CuT \end{cases}$$
(5)

式中:0为基质;1为溶洞;2为裂缝;3为微裂缝; *Ra*_n、*Co*_n、*Cu*_n代表当前节点n的均方根振幅、相干及 曲率数据,*RaT*、*CoT*、*CuT*为振幅、相干、曲率阈值. 根据阈值,判断节点是否为溶洞、裂缝性或微断裂, 若节点地震属性均不满足阈值条件则说明该栅格 为基质.

2.3 井间三维连通路径改进NSGA Ⅲ搜索算法

通过改进A*算法可搜索井间最优连通路径,但 由于缝洞型油藏存在不同尺度的溶蚀孔洞、裂缝, 实际井间有多条不同沟通能力的连通通道,因此三 维连通通道搜索本质是多目标、多约束评价问题. 传统三维雕刻中相干阈值、振幅阈值及均采用人工 设置,预设阈值主观性和局限性较强,研究结合复 杂性深层油藏地质特征改进NSGAⅢ多目标优化 算法,设计新的井间三维连通路径自动搜索模型, 自适应优化地震多属性阈值和融合权重系数等参 数,以搜索反映实际地质构造特征的沟通轨迹.

2.3.1 多目标优化算法 多目标优化是指在一定约 束条件下对多个目标同时优化并得到一组非支配 解,具体定义如下:

定义6:多目标优化算法

$$\begin{cases} X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m]^T \in \mathbb{R}^m \\ \min / \max F(x) = \\ [f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x), \dots, f_n(x)]^T \in \mathbb{R}^n \\ s.t. h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p \text{ or } \\ g_k(x) \ge 0, k = 1, 2, \dots, q \\ D = \{x \mid h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p \text{ or } \\ g_k(x) \ge 0, k = 1, 2, \dots, q \end{cases}$$
(6)

式中:X为决策向量 x_i 的集合,决策空间为m维实数 空间 R^m ;F(x)为目标函数集合, $f_i(x)$ 为子目标函 数,目标空间为n维实数空间 R^n ;约束条件包括等式 约束 $h_i(x) = 0 = 0 = g_k(x) \ge 0$ 不等式约束;符合约束 条件的决策变量集合D为可行解.

求解多目标问题实质是从可行解中找出所有 非支配解集合,通过Pareto支配判断解的优劣,定义 如下:

定义7:Pareto支配关系

$$\begin{bmatrix} \forall i \in \{1, 2, \dots, n, \} f_i(x_1) \ge f_i(x_2) \end{bmatrix} \cap \\ \begin{bmatrix} \exists i \in \{1, 2, \dots, n, \} f_i(x_1) > f_i(x_2) \end{bmatrix}, \tag{7}$$

式中:x₁,x₂为两组可行解,对于所有子目标解x₁均 不差于x₂且至少存在一个目标解x₁优于x₂即解x₁ 支配解x₂.当一个可行解不被其它任意解支配时, 则该解为一个非支配解.多目标优化的目标是找到 所有非支配解集,根据决策者偏好进一步选择.

2.3.2 目标函数设计 缝洞型油藏中主干断裂、岩溶管道、暗河等是一级井间连通方式,根据示踪剂测试报告沿大尺度裂缝、地下暗河沟通的通道往往见剂时间较短,推进速度较快;经由溶洞连通路径

往往示踪剂产出累积浓度较高.井间三维连通路径 搜索需同时考虑最短连通路径、最大流通体积等相 互矛盾的优化目标,即路径短的往往流通体积较 小,路径长的往往流通体积又较大,属于典型的多 目标优化问题.目标函数设计如下:

(1)连通路径长度代价

路径长度是生产井对间沟通路径途径结点距 离总和,由于地下流体优先沿大断裂、地下暗河方 向流动,主要沟通通道搜索要求连通路径长度尽可 能短.路径长度代价定义如下:

定义8:路径长度代价 f_i

$$f_{i} = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_{i})^{2} + (y_{i+1} - y_{i})^{2} + (z_{i+1} - z_{i})^{2}}, (8)$$

式中:n表示路径经过栅格点数,x_i,y_i,z_i为栅格点坐标,采用欧式距离计算两两相邻栅格点间长度.

(2) 连通路径体积代价

洞缝比是搜索路径途经栅格溶洞数占总数的 比值,用于衡量流通体积大小.由于岩溶管道、暗河 也是海相碳酸盐岩油藏重要的沟通方式,其连通路 径洞缝比会较大.路径连通体积代价定义如下:

定义9:路径流通体积代价f_P

$$R = \lfloor S = g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n, = T \rfloor$$

$$f_P(R) = \frac{w}{r} \qquad (9)$$

式中:R表示路径; $g_i(i, 1, 2, 3, ..., n)$ 表示路径上第i个栅格点坐标为(x_i, y_i, z_i),其中 g_1 表示路径起始点 S, g_n 表示路径终点 $T; f_P(R)$ 表示路径洞缝比,即路 径途径栅格属性评价为溶洞点(M(i)=1)的个数w占总数n的比值.

2.3.3 约束函数设计 深层碳酸盐油藏复杂介质 空间尺度差异大,介质不连续、非均匀、各向异性; 多相流体流动形式复杂,存在渗流、一维管流、裂缝 面上的二维流动、未充填溶洞中的三维"洞穴流"及 洞、缝、孔(基质岩块)介质间的流体交换(Liu et al., 2003). 对多重介质根据测井解释结果与井震标定 结果约束地震多属性阈值优化范围以判断可行搜 索空间,约束条件设置如下:

$$\begin{cases}
CoT \ge CoT_{\min} \\
RaT \ge RaT_{\min}, \\
CuT \ge CuT_{\min}
\end{cases}$$
(10)

式中:CoT、RaT、CuT为相干、振幅、曲率设置阈值, CoTmin、RaTmin、CuTmin分别为阈值搜索下限.根据 现场标定结果与井组地质结构设置各地震属性的 搜索范围.

2.3.4 改进井间三维连通路径 NSGA Ⅲ搜索算法 NSGA Ⅲ算法是求解多目标优化问题的高效算法, 运行速度快、收敛性好(Deb et al., 2014). 缝洞型油 藏井间连通路径搜索中,由于复杂的多重介质导致 路径搜索代价大、存在多解性,为此研究提出自适 应交叉变异概率方法改进算法以提升收敛速度.

(1)自适应交叉变异概率设计

若控制参数下搜索到的单条路径为优化个体, 种群为所有个体的集合,对个体进行交叉变异操作 产生新个体,根据目标函数评价所有个体产生新种 群,其中交叉和变异概率是影响种群进化的重要因 素.传统NSGAⅢ算法的交叉变异概率固定不变, 难以兼顾不同时期不同个体进化需求.为避免优秀 个体保留困难、收敛速度变慢、易陷入局部最优等 问题,研究综合考虑种群演化过程及个体适应度优 劣,自适应调整交叉变异概率.

连通路径搜索过程中不同阈值条件下存在大量相同的搜索路径,根据种群互异路径个数作为判断算法收敛程度依据.在演化不同阶段,基于支配路径数量设计针对种群的自适应交叉变异概率,并引入ln函数进行放缩,保证全局搜索最优路径的同时避免陷入局部最优.具体设计如式(11)所示.

$$Gp_{c} = P_{c\min} + \frac{-\ln\left(\frac{d}{N}\right)}{\ln N} * \frac{P_{c\max} - P_{c\min}}{2}, \quad (11)$$
$$Gp_{m} = P_{m\min} + \frac{-\ln\left(\frac{d}{N}\right)}{\ln N} * \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{2}$$

式中: Gp_c , Gp_m 为种群的交叉变异概率;d为种群中 互异路径个数;N是种群大小; P_{cmax} , P_{cmin} , P_{mmax} , P_{mmin} 为交叉变异概率最小最大值, 交叉概率范围为 0.4~0.8, 变异概率通常选择 0.01~0.10.

对个体而言根据适应度值优劣调整概率,较优 路径交叉变异概率较小,以尽量保存优良个体.为 增强搜索能力,引入三角函数离散化概率分布增强 个体搜索能力,如式(12)所示. Table 1 Search algorithm for 3D inter-well connection paths with fused seismic multi-attribute

输入:控制参数:种群大小NP,最大演化次数GENmax,交叉概率最大最小值p.max、p.min,变异概率最大最小值p.max、p.min

输出:最终种群 $P_{GEN_{max}}$ 1: 生成初始种群 $P_{GEN} = \{ \overrightarrow{x_1, x_2}, \dots, \overrightarrow{x_{NP}} \},$ 并初始化演化代数 $GEN \leftarrow 0, 生成参考点 Z$ 2: 根据改进 A*算法搜索路径通过公式(8)(9)计算目标函数适应值 $f(\vec{x}_i)$ ($i = 1, 2, \dots, NP$) 3: while $GEN < GEN_{max}$ do 4: 计算父代种群中的互异路径条数 d 通过公式(11)(12)(13)计算交叉变异概率 5. 交叉变异产生子代种群 Q_{GFN} 6: 合并父子代种群 R_{GEN}← P_{GEN} ∪ Q_{GEN} 7. 非支配排序(F_1, F_2, \cdots) = Non dominated sort(R_{GEN}) 8. 9: 初始化S_{GFN}←Ø,*i*=1 10: do $S_{GEN} \leftarrow S_{GEN} \cup F_i, i = i + 1$ 11: 12: while $|S_{GEN}| \leq NP$ 13: 关键层 $F_i \leftarrow F_{i+1}$ 14: if $|S_{GEN}| = NP$ then 15: $P_{GEN+1} \leftarrow S_{GEN}$ 16: break 17:else 18: $P_{GEN+1} = \bigcup_{j=1}^{l-1} F_j$ 从 F_l 挑选个体数 $K = NP - |P_{GEN+1}|$ 19: 自适应归一化Normalization(S_{GEN}) 20: 21: 参考点关联[$\pi(s), d(s)$]←Associate(S_{GEN}, Z), $\pi(s)$ 为参考点序号, d(s)为个体到参考线的距离 22: 通过小生境保留 F_l 层选择 K 个个体 P_{GEN+1} ← $Niching(K, \pi, d, Z, F_l)$ 23: GEN = GEN + 124: end while 25: return P_{GEN}

$$Ip_{cl} = \sin\left(\frac{f_{l} - f_{l\min}}{f_{l\max} - f_{l\min}} * \frac{\pi}{2}\right) * \frac{P_{c\max} - P_{c\min}}{2}$$

$$Ip_{cp} = \cos\left(\frac{f_{p} - f_{p\min}}{f_{p\max} - f_{p\min}} * \frac{\pi}{2}\right) * \frac{P_{c\max} - P_{c\min}}{2}, (12)$$

$$Ip_{ml} = \sin\left(\frac{f_{l} - f_{l\min}}{f_{l\max} - f_{l\min}} * \frac{\pi}{2}\right) * \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{2}, (12)$$

$$Ip_{mp} = \cos\left(\frac{f_{p} - f_{p\min}}{f_{p\max} - f_{p\min}} * \frac{\pi}{2}\right) * \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{2}$$

式中: Ip_{cl}, Ip_{ml}为路径长度目标的交叉变异概率, Ipcp, Ipmp为路径洞缝比目标的交叉变异概率;由于 路径长度目标取最小而洞缝比目标取最大,分别采 用 sin 和 cos 函数转换, f_i , f_b 为个体路径长度 length 和洞缝比 $p适应度值, f_{lmin}, f_{lmax}, f_{pmin}, f_{pmax}$ 为种群中两 目标的适应度函数最小最大值.个体部分概率取两 个目标的均值 $I_{p_c}, I_{p_m},$ 结合种群整体概率 G_{p_c}, G_{p_m} 作为个体自适应交叉变异概率 $P_{c}, P_{m},$ 如式(13) 所示.

$$P_{c} = Gp_{c} + Ip_{c}$$

$$P_{m} = Gp_{m} + Ip_{m}$$
(13)

改进后的自适应交叉变异概率较好地平衡了 演化过程的搜索能力和收敛性,避免陷入局部最优.

(2)改进井间三维连通路径多目标搜索算法

结合缝洞型油藏地质构造和流体流动特征,研 究融合地震多属性改进A*算法和NSGAⅢ算法, 设计井间三维连通路径改进多目标搜索算法如下:

实例分析 3

塔河奥陶系碳酸盐岩油藏储层经历加里东、海 西期早期、海西晚期、印支期等多期次构造运动,受 构造变形、风化剥蚀的影响,储层类型复杂多样(康 玉柱,1991).S80单元位于塔河油田67区,油藏平





均深度五千多米,含油层为奥陶系一间房组和鹰山 组(康志江等,2020).实验以S80单元TK626井组、 TK636H井组为研究对象,分别采用NSGAⅢ和论 文提出的新算法搜索井间三维连通路径,算法参数 设置如表2所示.

实验采用S80地区地震数据为相干数据、振幅数据以及曲率数据,栅格道间距为15m,采样间隔5.697m.振幅阈值下限为2000,相干阈值下限为0.6,曲率阈值下限为-2.

3.1 三维连通路径多目标搜索算法性能评价

以 TK626-TK663 井对为研究对象,改进前后 算法得到的最优解前沿分布对比如图 7 所示,通过 比较不同算法非支配解可知,解集的收敛性均较 好,但改进算法的解集涵盖原始NSGA Ⅲ算法的解 集,且分布更均匀、解集多样性更好.

绘制路径搜索收敛曲线如图 8 所示,算法迭代 前期收敛速度均较快,能快速搜索到全局较优解; 原始 NSGA III 算法迭代到第 19 次趋于稳定,但搜 索到的最优路径数目较少,说明算法未能有效跳出 局部最优,表现为早熟收敛;而改进算法在迭代 15 到 30 次之间搜索到更多最优路径并逐渐趋于平稳, 说明改进算法收敛性较佳.由于在搜索过程中,不 同参数下获取的井对沟通路径可能相同导致种群





图 9 TK636H井组三维连通路径搜索结果

Fig.9 3D communication path search results of well group TK636H

存在大量重复解,改进算法根据互异非支配路径数 量判断能提高收敛速度.

综上所述,提出的改进自适应交叉概率能有效 跳出局部最优,提高井间沟通路径全局搜索效率.

3.2 三维连通路径多目标搜索算法准确性评价 3.2.1 TK636H 井组连通路径多目标算法搜索 以 TK636H 井组为研究对象,采用论文提出的井间三 维连通路径多目标搜索算法搜索连通路径如图9所 示,蓝色为裂缝沟通点,褐色为溶洞沟通点.其中

表 3 TK636H 井组示踪剂测试结果						
Table 3Tracer test results of well group TK636H						
生产井	背景浓度(cd)	突破时间(d)	突破浓度(cd)	井距(m)	推进速度(m/d)	累积浓度(cd)
S80	91.2	12	326.8	691	57.6	24 588.7
TK611	101.4	11	244.5	1631	148.3	19 852.4
TK747	144.7	17	374.1	1191	70.1	20 641.2



图 10 TK636H-TK747 井对搜索路径分类结果 Fig.10 Search path classification results of the well pair TK636H-TK747 a. 第一类路径;b. 第二类路径;c. 第三类路径



图 11 TK636H 井组缝洞发育特征 Fig.11 Fractured-vuggy development characteristics of well group TK636H a. 三维路径图;b. 裂缝展布图;c. 溶洞展布图

TK636H-S80井对搜索路径沿北西一南东大尺度断 裂方向的岩溶通道沟通,S80井和TK636H井周围 溶洞发育;TK636H-TK611井对自动搜索路径沿北 东一南西主干断裂方向沟通,在TK611井附近溶洞 发育,进入溶洞存在入口分支;TK636H-TK747井 对搜索路径为多条不同尺度的裂缝沟通,TK747井 周溶洞发育.

以TK636H-TK747井对为例,共搜索到3类形态、长度、空间配置关系不同的连通路径,

第一类(图 10 a)路径以裂缝为主要连通方式, 前段经过高角度裂缝,在TK747井周经过一个溶 洞;第二类路径(图 10 b)前段与第一类路径重叠,但 后段 TK747 井周附件区域通过高角度裂缝沟通多 个溶洞;第三类路径(图 10c)前段与前 2 类路径存在 不同分支.第一类路径长度较短,经过溶洞数较少, 第二、三类路径整体存在多通道沟通.

3.2.2 TK636H 井组地震静态分析 实验进一步绘制 TK636H 井组区域地震属性展布图,基于静态地 震资料分析井对间的地质特征.相干属性与曲率属 性多描述不同尺度裂缝发育特征,振幅属性用于刻 画溶蚀孔洞发育特征,如图 11 所示.其中橙色为大 尺度裂缝,蓝色为微裂缝,红色为溶洞.图 11a 为井 组三维路径图.图 11b 为 TK636H 井组相干与曲率 三维雕刻图,各井对智能搜索的沟通通道方向与区



块油藏途径主干断裂方向基本一致,如TK636H-S80井对沿北西-南东方向沟通,TK636H-TK611 井对沿北东-南西方向沟通.图11c显示TK636H 井、S80井、TK611井与TK747井周围溶洞发育特 征,与搜索路径途径溶洞分布基本吻合,说明研究 提出的智能搜索算法优先考虑了主干断裂、岩溶管 道、暗河等主要流动方向,能有效刻画缝洞空间配 置关系.

3.2.3 TK636H 井组示踪剂测试分析 实验进一步 根据示踪剂测试结果分析井间连通关系.TK636H 井组于2009年7月17日注入BY-1示踪剂,至2010 年1月29日历时195天,连通各生产井示踪剂浓度 曲线及监测结果如图12和表3所示.

示踪剂产出浓度的高低往往用于刻画是否存 在高渗通道,产出浓度越高表明连通程度越强;示 踪剂的形态、有效尖峰个数表征流体在储层中的流 动形式和井间沟通通道数目.由图12可知,S80井 示踪剂浓度产出曲线呈单峰铅锤上升形态,累积浓 度较大,说明注采井间存在一个主通道,与自动搜 索到的沿北西-南东方向岩溶管道通道特征吻合; TK611井浓度产出曲线呈现铅锤状上升且存在两 个远高于背景浓度值2倍的邻近尖峰,说明注入示 踪剂通过两个以上且长度相近的通道先后到达,这 与自动搜索到沿北东主干断裂为主在TK636H井 周存在两个分支进入溶洞的双通道特征吻合; TK747 井示踪剂浓度产出曲线初期呈铅锤上升伴 有多个相邻大小不一的尖峰形态,说明示踪剂沿多 路径到达且时间相近,这与自动搜索路径结果前半 段存在多裂缝分支,后半段井周沿两个连续溶洞沟 通的多通道特征较为吻合.综上所述,三个注采井 对示踪剂浓度产出曲线特征与算法自动搜索的连 通路径形态特征基本吻合.

实验基于静态地震资料缝洞体雕刻分析了 TK636H井组间的缝洞空间配置关系,进一步采用 示踪剂测试浓度产出曲线分析井对间的连通情况, 与搜索路径地质结构特征基本契合.综上所述,研 究提出融合地震多属性改进分层路径多目标搜索 算法能较准确搜索到井间三维连通路径.

4 结论

针对深层缝洞型油藏连通路径多解性特点,研究基于地震多属性构建三维搜索空间,结合改进A* 算法和NSGA Ⅲ设计分层路径搜索模型.以路径长 度与流通体积为目标,自适应调整地震多属性阈值 和融合权重参数,同时设计新的自适应交叉变异概 率提高模型的搜索效率和收敛性.对塔河67区S80 单元典型井组的实验结果表明改进NSGAII多目 标算法能有效避免早熟收敛,且三维连通路径搜索 结果与地震资料分析、示踪剂测试结果间接反映的 缝洞空间配置关系基本吻合.新算法能高效准确地 搜索出井间主要连通路径,对注水开发阶段工作措 施调整具有一定的指导意义.

考虑到井间连通通道的复杂性,将进一步考虑 结合蚂蚁体、波阻抗等属性刻画中小尺度裂缝和溶 蚀孔洞等情况,以更全面细致刻画单元连通情况.

References

- Albertoni, A., Lake, L.W., 2002. Inferring Inter-Well Connectivity Only from Well-Rate Fluctuations in Waterfloods. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 6(1):6-16. https://doi.org/ 10.2118/83381-PA
- Bao, J. S., Zhang, M. Y., Ge, S. R., et al., 2022. Underground Driverless Path Planning of Trackless Rubber Tyred Vehicle Based on Improved A* and Artificial Potential Field Algorithm. *Journal of China Coal Society*, 47 (3): 1347-1360 (in Chinese with English abstract).
- Cao, W., Deng, L. W., Guo, Y., et al., 2021. Research on Path Planning Method of Ship Based on Improved NSGA -III. *Ship Engineering*, 43(S1):343-347+375 (in Chinese with English abstract).
- Deb, K., Jain, H., 2014. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference - Point - Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4):577-601. https://doi.org/10.1109/ TEVC.2013.2281535
- Fan, J., Lei, T., Dong, N. J., et al., 2022. Multi-Objective UAV Path Planning Based on an Improved NGSA-II Algorithm. *Fire Control & Command Control*, 47(2):43– 48+55 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. L., He, H. B., Fu, Y., et al., 2021. Interchange and Charging Path Planning of Shared Electric Vehicles Based on A* Algorithm Combined with Hierarchical Programming. *Proceedings of the CSEE*, 41(22):7668-7681 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. H., Ji, M. J., Zhang, W. D., 2020. AGV Global Path Planning Integrating with the Control of Multi-Objectives and Speed. *Control and Decision*, 35(6): 1369-1376 (in Chinese with English abstract).
- Han, G. H., Qi, L. X., Li, Z. J., et al., 2006. Prediction of the

Ordovician Fractured-Vuggy Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield. *Oil & Gas Geology*, 6: 860-870+878. (in Chinese with English abstract).

- Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B., 1968, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2): 100-107. https://doi. org/ 10.1109/ TSSC.1968.300136.
- Heffer, J. K., Fox, et al., 1997. Novel Techniques Show Links between Reservoir Flow Directionality, Earth Stress, Fault Structure and Geomechanical Changes in Mature Waterfloods. Society of Petroleum Engineers Journal, 2(2): 91-98.
- Kang, Y. Z., 1991. On Regularity and Oil-Searching Direction of Hydrocarbon in Tarim Basin. *Earth Science*, 16(4):429– 436 (in Chinese).
- Kang, Y. Z., 2008. Characteristics and Distribution Laws of Paleokarst Hydrocarbon Reservoirs in Palaeozoic Carbonate Formations in China. *Natural Gas Industry*, 28(96): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Kang, Z. J., Li, Y., Ji, B. Y., et al., 2020. Key Technologies for EOR in Fractured-Vuggy Carbonate Reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 41(2): 434-441 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. B., Li, X. H., Rong, Y. S., 2014. The Seismic Attribute Characterization of Fracture - Vug Carbonate Reservoir Connectivity and Its Application in Waterflood Development. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 21(6): 65-67+71+115 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., 2013. The Theory and Method for Development of Carbonate Fractured-Cavity Reservoirs in Tahe Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 34(1): 115-121 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Bodvarsson, G. S., Wu, Y. S., 2003. Analysis of Flow Behavior in Fractured Lithophysal Reservoirs. *Journal of Contaminant Hydrology*, 62(Apr/May):189-211. https: //doi.org/ 10.1016/S0169-7722(2)00169-9
- Liu, L. F., Sun, Z. D., Yang, H. J., et al., 2009. Seismic Attribute Optimization Method and Its Application for Fractured-Vuggy Carbonate Reservoir. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(6): 747-754+783+648-649 (in Chinese with English abstract).
- Ma, A.L., Jin, Z.J., Li, H.L., et al., 2020. Secondary Alteration and Preservation of Ultra-Deep Ordovician Oil Reservoirs of North Shuntuoguole Area of Tarim Basin NW China. *Earth Science*, 45(5):1737-1753(in Chinese with English abstract).
- Marfurt, K. J., Kirlin, R. L., Farmer, S. L., et al., 1998. 3-D

Seismic Attributes Using a Semblance-Based Coherency Algorithm. *Geophysics*, 63(4): 1122-1479. https://doi. org/10.1190/1.1444415

- Meakin, P., Wagner, G., Vedvik, A., et al., 2000. Invasion Percolation and Secondary Migration : Experiments and Simulations. *Marine and Petroleum Geology*, 17(7):777-795. https://doi.org/10.1016/S0264-8172(99)00069-0
- Pollock, D.W., 1988.Semianalytical Computation of Path Lines for Finite-Difference Models. *Groundwater*, 26:743-750. https://doi.org/ 10.1111/j.1745-6584.1988.tb00425.x.
- Wang, B., Yang, Y., Cao, Z.C., et al., 2021. U-Pb Dating of Calcite Veins Developed in the Middle-Lower Ordovician Reservoirs in Tahe Oilfield and Its Petroleum Geologic Significance in Tahe Oilfield. *Earth Science*, 46(9):3203-3216 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. B., Hao, C., Zhang, P., et al., 2019. Path Planning of Mobile Robots Based on A* Algorithm and Artificial Potential Field Algorithm. *China Mechanical Engineering*, 30(20): 2489–2496 (in Chinese with English abstract).
- Yang, P., Sun, Z.D., Xiang, H.L., et al., 2013. Seismic Strategy for Predicting Highly Profitable Wells in the Fractured - Vuggy Carbonate Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 537-541.https://doi. org/10.1016/S1876-3804(13)60070-1
- Yousef, A. A., 2006. Investigating Statistical Techniques to Infer Interwell Connectivity from Production and Injection Fluctuations(Dissertation). The University of Texas at Austin, Texas, 1-540.
- Zhao, H., Kang, Z.J., Zhang, Y., et al., 2014. An Interwell Connectivity Numerical Method for Geological Parameter Characterization and Oil - Water Two - Phase Dynamic Prediction. Acta Petrolei Sinica, 35(5): 922-927 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍久圣,张牧野,葛世荣,等,2022.基于改进A*和人工势场算 法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划.煤炭学报,47(3): 1347-1360.
- 曹旺,邓烈威,郭瑶,等,2021.基于改进NSGA-Ⅲ的船舶路径 规划方法.船舶工程,43(S1):343-347+375.
- 樊娇, 雷涛, 董南江, 等, 2022. 基于改进 NSGA-Ⅱ算法的多目 标无人机路径规划.火力与指挥控制, 47(2):43-48+55.
- 葛晓琳,何鈜博,符杨,等,2021.融合分层规划和A*算法的共 享电动汽车换车与充电路径规划.中国电机工程学报,41 (22):7668-7681.
- 郭兴海,计明军,张卫丹,2020.融合多目标与速度控制的AGV 全局路径规划.控制与决策,35(6):1369-1376.
- 韩革华,漆立新,李宗杰,等,2006.塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝

洞型储层预测技术.石油与天然气地质,6:860-870+878.

- 康玉柱,1991.试论塔里木盆地油气分布规律及找油方向.地球 科学,1991(4):429-436.
- 康玉柱,2008.中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分 布.天然气工业,2008(6):1-12+141.
- 康志江,李阳,计秉玉,等,2020.碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收 率关键技术.石油与天然气地质,41(2):434-441.
- 李小波,李新华,荣元帅,等,2014.地震属性在塔河油田碳酸 盐岩缝洞型油藏连通性分析及其注水开发中的应用.油 气地质与采收率,21(6):65-67+71+115.
- 李阳,2013. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法.石油学报,34(1):115-121.

- 刘立峰,孙赞东,杨海军,等,2009. 缝洞型碳酸盐岩储层地震属 性优化方法及应用.石油地球物理勘探,44(6):747-754+ 783+648-649.
- 马安来,金之钧,李慧莉,等,2020.塔里木盆地顺北地区奥陶系 超深层油藏蚀变作用及保存.地球科学,45(5):1737-1753.
- 王斌,杨毅,曹自成,等,2021.塔河油田中下奧陶统储层裂缝方 解石脉U-Pb同位素年龄及油气地质意义.地球科学,46 (9):3203-3216.
- 王洪斌,郝策,张平,等,2019. 基于A*算法和人工势场法的移 动机器人路径规划.中国机械工程,30(20):2489-2496.
- 赵辉,康志江,张允,等,2014.表征井间地层参数及油水动态的 连通性计算方法.石油学报,35(5):922-927.