

引用格式:张金鼎,张凯,张黎明,等.融合自适应变异策略与差分进化算法的油藏自动历史拟合方法[J].油气地质与采收率,2025,32(2):152-162.

ZHANG Jinding, ZHANG Kai, ZHANG Liming, et al. Automatic reservoir history matching method based on adaptive mutation strategy and differential evolution algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(2): 152-162.

融合自适应变异策略与差分进化算法的油藏自动历史拟合方法

张金鼎¹, 张凯^{1,2}, 张黎明¹, 刘丕养², 陈旭¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:差分进化算法作为一种经典的进化算法,具有全局搜索能力、便于实现、无需梯度等优势,在油藏自动历史拟合中广泛应用,但算法中参数的设置对历史拟合结果影响较大,在高维问题中存在着收敛停滞的问题。为解决上述难题,提出一种融合自适应变异策略与差分进化算法的油藏自动历史拟合方法。首先,基于主成分分析方法对油藏模型的高维参数进行降维,将降维后的参数作为差分进化算法中调整的参数,以压缩变量的搜索空间,提升算法搜索效率;其次,结合自适应变异策略与差分进化算法,借助于算法搜索过程中的历史经验指导当前种群的更新,当种群个体停止收敛时,则切换差分进化算法的变异策略,改变种群的迭代更新方式,以此避免油藏参数停止优化调整的情况;此外,为使更新后模型参数与先验分布特征保持一致,应用分位数变换策略转换更新后参数的分布情况,将非高斯分布的数据变换为高斯分布,使更新后的模型更加符合实际地质参数的约束条件。提出算法在三维油藏模型上进行测试验证,结果表明:相比传统的差分进化算法框架,改进的差分进化算法不仅能够提升历史拟合求解的收敛效果,而且反演的油藏模型参数更加符合实际地质特征,在相同的计算条件下,可获得更优的历史拟合模型,数据拟合效果更显著。

关键词:油藏数值模拟;自动历史拟合;差分进化算法;自适应方法;分位数变换

文章编号:1009-9603(2025)02-0152-11

DOI:10.13673/j.pgre.202310009

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Automatic reservoir history matching method based on adaptive mutation strategy and differential evolution algorithm

ZHANG Jinding¹, ZHANG Kai^{1,2}, ZHANG Liming¹, LIU Piyang², CHEN Xu¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao City, Shandong Province, 266033, China)

Abstract: As a classical evolution algorithm, the differential evolution algorithm has the advantages of global search ability, easy implementation, and no gradient. It has been widely used in automatic reservoir history matching. However, the setting of parameters in the algorithm has a significant influence on the result of history matching, and there is convergence stagnation in high-dimensional problems. In order to solve the above problems, an automatic reservoir history matching algorithm was proposed based on the adaptive mutation strategy and differential evolution algorithm. Firstly, based on the principal component analysis method, the high-dimensional parameters of the reservoir model were reduced, and the reduced parameters were used as the parameters ad-

收稿日期:2023-10-15。

作者简介:张金鼎(1996—),男,河南开封人,在读博士研究生,从事油藏自动历史拟合方法研究。E-mail: zhangjinding@hotmail.com。

通信作者:张凯(1980—),男,四川南充人,教授,博导。E-mail: zhangkai@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“油藏开发智能实时优化”(52325402),“基于强化学习的离线-在线交互式油藏开发生产实时优化方法”(52274057),“基于迁移学习的油藏开发注采优化方法研究”(52074340),“基于电磁支撑剂的水力压裂裂缝监测理论与方法”(51874335);国家重点研发计划“CO₂驱油及封存安全监测技术”(2023YFB4104200);中国海油重大科技项目“基于代理模型的海上油藏智能注采流场实时调控优化方法研究”(CCL2022RCPS0397RSN)。

justed in the differential evolution algorithm to compress the search space of the variables and improve the search efficiency of the algorithm. Secondly, based on the adaptive mutation strategy and differential evolution algorithm, the historical experience in the search process of the algorithm was used to guide the update of the current population. When the individual of the population stopped converging, the mutation strategy of the differential evolution algorithm was switched to change the iterative update mode of the population to avoid the situation that the reservoir parameters stopped optimization and adjustment. In addition, to make the updated model parameters consistent with the prior distribution characteristics, the quantile transformation strategy was applied to transform the distribution of the updated parameters, and the data of non-Gaussian distribution was transformed into Gaussian distribution so that the updated model was more in line with the constraints of the actual geological parameters. The proposed algorithm was tested and verified on a three-dimensional reservoir model. The results show that compared with the traditional differential evolution algorithm framework, the improved differential evolution algorithm can improve the convergence effect of the history matching solution, and the inverted reservoir model parameters are more in line with the actual geological characteristics. Under the same calculation conditions, a better history matching model can be obtained, and the data matching effect is more significant.

Key words: numerical simulation of reservoir; automatic history matching; differential evolution algorithm; adaptive method; quantile transformation

油藏历史拟合是油藏数值模拟中一个基础且重要的环节。其主要内容是在初步地质建模^[1-2]的基础上,通过反复调整油藏模型中不确定的属性参数,实现历史生产数据的拟合以及模型的校正,为后续基于该模型的生产预测、方案设计以及油藏管理提供保障。油藏历史拟合问题是一个不适定的反问题,其存在多个解能够同时拟合历史生产数据,但判别最接近地下油藏状态的模型仍需要对多种资料进行多方位分析。相比于外国石油大公司对油藏历史拟合的重视程度,中国油田关于历史拟合问题的研究仍具有一定的局限性。进行高效的油藏自动历史拟合方法研究是十分必要的,对于油藏生产开发具有重要的指导意义。

自20世纪60年代,中外已经展开了油藏历史拟合与计算机辅助的自动历史拟合算法研究。早期历史拟合是由人工完成的,即人为调整油藏参数以拟合油藏动态变化的指标。尽管人工历史拟合方法操作灵活,但难以对大量的不确定性参数同时进行调整,其过程耗时严重。

随着计算机技术的发展,逐渐出现了自动历史拟合方法,即结合最优化理论方法与数值模拟技术^[3-6],自动调整模型中不确定的参数,提高拟合效率。邓宝荣等研究了计算机辅助自动历史拟合在油藏数值模拟中的应用,结合梯度类算法最小化历史拟合目标函数,数值模拟试验表明了计算机辅助历史拟合方法的可靠性^[7]。叶继根等针对大规模角点网格模型进行自动历史拟合方法研究,将其分为储层拟合、全油田和油水井生产动态趋势拟合与精细拟合3个层次进行^[8]。闫霞等提出一种结合集合卡尔曼滤波与流线的自动历史拟合方法,并在二维模型上进行验证,结果表明其方法可大大减少模拟

时间^[9]。KAZEMI等介绍了3种历史拟合的参数调整方法,并将该方法在北海油田测试验证,其中基于局部参数调整的方法效果最好^[10]。刘伟等提出一种基于单井敏感性区域EnKF的油藏辅助历史拟合方法,根据程函方程构建局域化矩阵,约束集合卡尔曼滤波中梯度的更新,减小伪相关性,实例计算结果表明了该方法的有效性^[11]。SHAMS等将和声搜索优化算法应用到油藏辅助历史拟合中,结果表明,与粒子群优化算法、遗传算法相比,和声搜索优化算法可以找到更优的解,节省历史拟合花费的时间^[12]。除此之外,其他相关自动历史拟合方法也展现出较好的应用效果^[13-14]。由此可以看出,经过中外学者的共同研究,自动历史拟合算法由最初的梯度法、集合卡尔曼滤波方法,发展到了目前无梯度的进化算法等智能方法,自动历史拟合方法应用更容易、计算效率更高。

差分进化算法作为进化算法中一种高效、简洁的算法,具有较好的全局搜索能力,已在油藏自动历史拟合问题中应用。HAMDI等应用差分进化算法于致密凝析气井的历史拟合中,反演流体属性与裂缝参数等^[15]。SANTHOSH等提出一种合成的差分进化算法,其中结合了局部搜索策略提升算法在油藏自动历史拟合问题上的收敛性^[16]。张鲜等采用差分进化算法原理改进标准的Levenberg-Marquardt算法,结果表明该方法收敛速度更快,适合大规模历史拟合问题^[17]。MA等结合差分进化算法与代理模型求解历史拟合问题,结果验证差分进化算法可获得更优的历史拟合解,在迭代过程中,种群参数的多样性较好。尽管差分进化算法在自动历史拟合问题中展现了其适用性,但算法参数的设置对结果影响较大,导致在高维油藏模型历史拟

合中存在收敛停滞^[18]。

为此,研究了2种基本的差分进化算法在油藏自动历史拟合的应用效果,并在此基础上,融合了自适应的种群变异策略提升算法的收敛性。为保证种群更新后参数的分布,对更新后的参数进行分位数变换,使其服从标准正态分布,获得更优的历史拟合解。该研究方法对北海油田模型进行油藏自动历史拟合测试,验证了差分进化算法在实际油藏自动历史拟合问题中的有效性。

1 降维历史拟合方法

1.1 历史拟合目标函数

油藏模型参数的不确定性会导致剩余油分布以及储量的预测存在较大误差^[19-21],而油藏自动历史拟合的目的是使模型的模拟生产数据与历史生产数据拟合,以反演地下模型的参数分布。在贝叶斯概率理论^[22]框架下,不仅要拟合历史生产数据,也要使模型参数分布与先验认识保持一致,历史拟合的目标函数可表示为:

$$O(m) = \frac{1}{2} (m - m_{pr})^T C_M^{-1} (m - m_{pr}) + \frac{1}{2} [d_{obs} - g(m)]^T C_D^{-1} [d_{obs} - g(m)] \quad (1)$$

式中: $O(m)$ 为历史拟合目标函数; m 为模型中不确定的参数; m_{pr} 为模型参数的先验分布; C_M^{-1} 为先验分布的协方差矩阵的逆矩阵; d_{obs} 为历史生产数据; g 为油藏数值模拟器; C_D^{-1} 为观测误差协方差矩阵的逆矩阵。

式(1)第1项表示模型参数与先验分布的差异,第2项表示模型模拟生产数据与历史生产数据的差异。

标准化的历史拟合目标函数可表示为:

$$O_N(m) = O(m)/N_d \quad (2)$$

式中: $O_N(m)$ 为标准化的历史拟合目标函数; N_d 为历史观测数据的维度。

油藏自动历史拟合过程即为最小化目标函数的过程,可利用梯度算法与无梯度算法进行求解,获取一个或者多个最优的油藏模型,进而分析模型参数的不确定性,为后续的生产预测及优化奠定基础。

1.2 主成分分析方法

当历史拟合中调整参数为整个模型场的参数,如网格渗透率、孔隙度、净毛比等,参数数量随模型网格数增加,若模型网格数达数百万,则调整参数的数量也达数百万,致使传统算法无法求解。因

此,采用主成分分析方法^[23-25]将高维模型参数降至低维,减少历史拟合过程中优化变量的数量。

首先对油藏模型的先验参数去中心化:

$$X_c = [x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_{ns} - \bar{x}]^T \quad (3)$$

式中: X_c 为去中心化的先验模型参数; x_{ns} 为第 ns 个样本的参数; ns 为样本数量; \bar{x} 为先验模型参数的均值。

对去中心化的矩阵 X_c 进行奇异值分解:

$$X_c = U \Sigma V^T \quad (4)$$

式中: U 表示左奇异矩阵; Σ 表示奇异值矩阵; V 表示右奇异矩阵。

若选取降维后的 s 个主要成分,则模型参数重构过程可表示为:

$$X_{re} = U_s \Sigma_s m_s + \bar{x} \quad (5)$$

式中: X_{re} 为重构的模型参数; U_s 为SVD分解后前 s 个主成分构成的左奇异矩阵; Σ_s 为SVD分解后前 s 个主成分构成的奇异值矩阵; s 为主成分分析中选取的主成分数量; m_s 为降维后的 s 个变量。

传统历史拟合方法将原始油藏模型参数作为调整变量,变量维度高,求解过程复杂。通过主成分分析方法,可将数百万油藏参数压缩至数百维,提取参数主要特征,降低历史拟合求解难度。一般的进化算法适用变量范围为数百维,因此,结合主成分分析方法更适合进化算法求解油藏自动历史拟合问题。

2 改进的差分进化算法

历史拟合目标函数是衡量油藏模型与实际油藏误差大小的一个指标,求解历史拟合问题即需要结合优化算法最小化该目标函数。差分进化算法是一种启发式的、基于种群迭代寻优的优化算法,通过种群的变异、交叉、选择等操作实现种群的更新迭代,在多个领域都有广泛应用^[26-27]。改进的差分进化算法示意图如图1所示。

2.1 差分进化算法流程

初始化种群 首先初始化种群。根据变量的上、下限范围随机生成初始种群,可表示为:

$$X^0 = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,p} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,p} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: X^0 为种群中的每个个体,每一列表示变量的一个维度; n 为种群数; p 为变量维度。

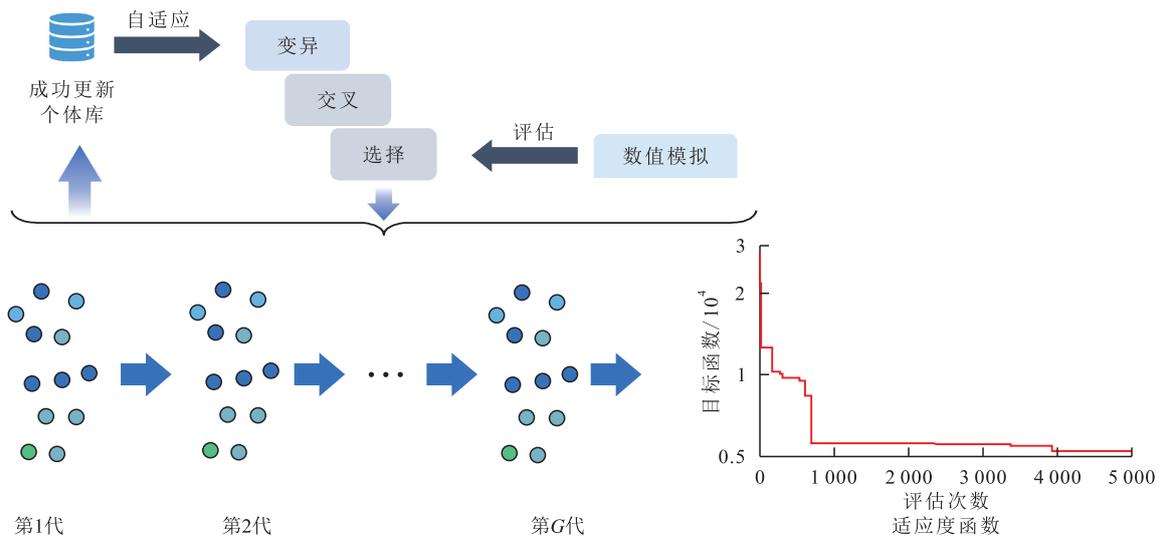


图1 改进的差分进化算法示意
Fig.1 Differential evolution algorithm

种群变异策略 研究测试了2种群变异策略,分别为DE/rand/1与DE/best/1,2种算法的区别在于变异操作不同,其具体过程如下:

通过变异操作产生子代,变异策略DE/rand/1可表示为:

$$v_i^G = x_{r_1}^G + F(x_{r_2}^G - x_{r_3}^G) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: v_i^G 为第G代种群中第i个个体交叉后的变量; i 为种群中的个体; G 为迭代次数; $x_{r_1}^G, x_{r_2}^G, x_{r_3}^G$ 为第G代种群中随机选择的3个个体; F 为变异系数。

变异策略DE/best/1可表示为:

$$v_i^G = x_{\text{best}}^G + F(x_{r_1}^G - x_{r_2}^G) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: x_{best}^G 为第G代的最优个体。

种群交叉 进行种群的交叉操作,可表示为:

$$u_{ij}^G = \begin{cases} v_{ij}^G & \text{if } U_j(0,1) \leq CR \\ x_{ij}^G & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式中: u_{ij}^G 为第i个个体的第j个维度在第G代交叉后的变量; u 为种群个体交叉后的变量; j 为个体的特征维度; v_{ij}^G 为第G代变异后第i个个体的第j个维度; $U_j(0,1)$ 为在0~1之间根据均匀分布采样; CR 为交叉系数; x_{ij}^G 为第G代的第i个个体的第j个维度。交叉操作即对每一个维度进行概率性的更新。

种群选择 最后进行种群选择操作,可表示为:

$$x_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^G & \text{if } f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ x_i^G & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_i^{G+1} 为第i个个体在第G+1代选择后的变量; u_i^G 为第i个个体在第G代交叉后的变量; f 为进行适应度值评估,即目标函数; x_i^G 为第i个个体在第G代选择后的变量。

在进化算法领域中,求解的目标函数往往也被

称作适应度函数。如果通过变异与交叉操作获得的新个体适应度函数值低于上一代该个体的适应度函数值,则进行更新;反之,个体不进行更新。

2.2 自适应变异策略

在很多测试函数,差分进化算法存在收敛停滞的问题,即种群个体成功更新的个体数量逐渐变少,致使目标函数不再优化。种群个体更新是通过变异操作产生新个体,通过交叉扰动个体增加多样性,通过选择的操作更新个体,在进行选择操作时,若新个体的适应度函数值没有优化,则不更新个体。从理论上分析,变异操作是影响个体成功更新的最关键因素。因此,为提升算法在复杂问题上的收敛性,需要改进变异策略。引入了一种自适应变异策略^[28],其基本思想是:若算法收敛未停滞,则沿用原先的变异策略;若算法收敛出现停滞,则更换新的变异策略。

首先,针对种群中每个个体,计算其迭代过程中未成功更新的次数 q_i^{G+1} :

$$q_i^{G+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ q_i^G + 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

式中: q_i^{G+1} 为第G+1代中第i个个体未成功更新的次数; q_i^G 为第G代中第i个个体未成功更新的次数;若该个体成功更新,则令 q_i^{G+1} 为0;反之,则 q_i^{G+1} 逐渐增加。

根据式(11)计算未成功更新次数的平均值:

$$\bar{q}^G = \left(\sum_{i=1}^n s_i^G \cdot q_i^G \right) / \left(\sum_{i=1}^n s_i^G \right) \quad (12)$$

$$s_i^G = \begin{cases} 1 & \text{if } f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

式中： \bar{q}^G 为第G+1代个体未成功更新次数的平均值； s_i^G 为第i个个体在第G代是否成功更新，1表示成功更新，0表示未成功更新， s_i^G 计算的平均值为所有未成功更新个体的平均值，而非整个种群的平均值。

通过判断 \bar{q}^G 与一个预设值 Q_{tor} 的大小，进行变异操作的自适应选择。若 \bar{q}^G 小于预设值 Q_{tor} ，则选择变异策略1；否则，选择变异策略2。

在变异策略2中，最近成功更新的个体将会存在数量为 N_s 的库中，随机挑选的个体不再从上一代种群中随机挑选，而是从该成功更新的个体中挑选，即2种变异操作可表示为：

$$v_i^G = \hat{x}_{r_1}^G + F(\hat{x}_{r_2}^G - \hat{x}_{r_3}^G) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$v_i^G = x_{best}^G + F(\hat{x}_{r_1}^G - \hat{x}_{r_2}^G) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中： $\hat{x}_{r_1}^G, \hat{x}_{r_2}^G, \hat{x}_{r_3}^G$ 为从成功更新个体库中选择的个体。

预设值 Q_{tor} 是该自适应变异策略中的一个影响参数，当 Q_{tor} 趋近于无穷大时，等同于常规的差分进化算法，即仅从父代中随机挑选个体进行变异操作；当 Q_{tor} 值趋近于0时，意味着算法仅从最近成功更新的个体中挑选进行变异操作。理论算法测试中推荐的 Q_{tor} 值为32，但由于数值模拟的计算耗时问题，历史拟合迭代次数往往受限于时间要求，因此，在本文中设置 Q_{tor} 值为5。

2.3 分位数变化

根据主成分分析方法降维后的变量服从标准正态分布，而在差分进化算法中，种群个体参数的更新是通过变异、交叉、选择完成的，不能保证变量服从标准正态分布，因此在变量重构时会导致重构的模型与先验模型存在误差，这导致历史拟合获得模型参数的分布不符合实际地质参数分布。因此，提出分位数变换方法^[29]将种群更新后的参数进行转换，使其服从标准正态分布，约束变量更新的分布特征。分位数变换方法基于样本数据的累积概率分布，可以将其他分布转化为标准正态分布，其计算式如下：

$$\hat{\zeta} = \mathcal{N}^{-1}[\phi(\zeta)] \quad (16)$$

式中： ζ 为原始数据； $\hat{\zeta}$ 为变换后服从标准正态分布的数据； \mathcal{N} 为标准正态分布函数； ϕ 为累积概率分布函数。

3 历史拟合方法流程

整个自动历史拟合方法流程如图2所示，具体

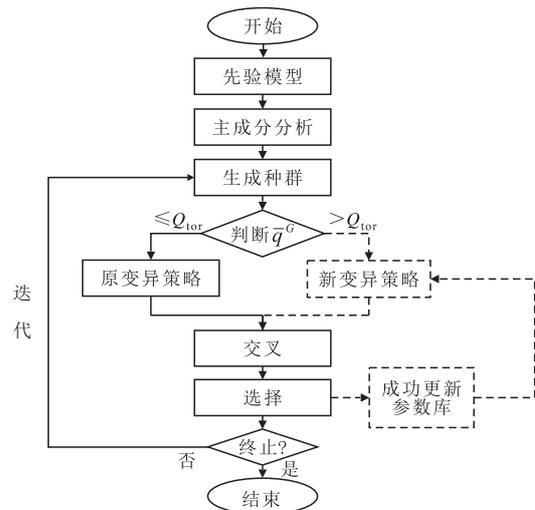


图2 自动历史拟合方法流程示意
Fig.2 Automatic history matching process

过程为：①对模型参数数据降维，根据油藏模型参数的先验样本，使用主成分分析方法进行降维重构，使用低维的主要特征变量表征高维模型参数。②生成差分进化算法的初始种群，设置种群数、迭代次数、变异系数、交叉系数等相关参数。③进行变异操作，首先将种群成功更新的个体加入到样本库中，当种群未成功更新系数 \bar{q}^G 小于 Q_{tor} 时，则使用原变异策略；否则，使用新变异策略。④进行交叉操作，随机选取个体的一定维度进行更新，提升种群的多样性。⑤进行选择操作，对更新后的低维变量进行分位数变换，并将变量重构至高维，进而使用油藏数值模拟器评估目标函数(适应度函数)，若目标函数小于上一代个体的目标函数，则更新个体；反之，则个体不更新。⑥重复步骤③—⑤。种群进行迭代更新，直至满足终止条件。⑦进行结果后处理，筛选出目标函数最低的一系列模型，分析数据拟合效果以及模型参数的分布情况。

4 实例测试

4.1 油藏模型建立

测试油藏实例为位于欧洲北海的SAIGUP油藏模型^[30-31]，该模型用于研究浅海相油藏的地质不确定性对于生产预测的影响。模型网格数量为40×120×20，网格的尺寸为75 m×75 m×4 m，模型共包含79 000个激活网格(图3)。

油藏采用水驱的方式进行开发，模型包括10口注水井与16口生产井；其中，注水井的生产制度为定注入量，生产井的生产制度为定液量。油藏模型包含许多复杂断层，导致注水井与生产井间油水流

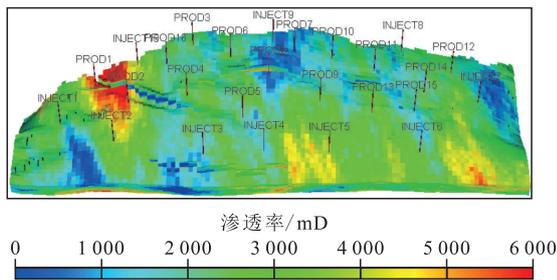


图3 油藏模型示意
Fig.3 Reservoir model

动关系极其复杂。对该油藏模型进行自动历史拟合,需拟合的生产数据为16口生产井的产油量与产水量以及10口注水井的井底流压,调整的不确定性参数为模型横坐标方向的渗透率参数。

4.2 参数降维重构

首先基于该油藏地质模型,使用随机建模方法生成2000个非条件的先验模型,描述油藏渗透率的分布特征。先验模型参数为横坐标方向网格渗透率参数,根据生成的2000个先验样本,进行主成分分析,将96000个渗透率参数降维至400个低维变量。由图4可以看出,当渗透率参数维度降低至400维时,保留信息比例为0.986,表明400个低维变量可以有效表征该油藏模型原始的参数特征,信息损失仅为原数据的1.4%。

由图5可以看出,通过主成分分析方法重构模型的渗透率分布与先验模型渗透率分布十分接近。针对该油藏的自动历史拟合问题,尽管对原始油藏参数进行了降维,但仍需要优化求解400维的变量,

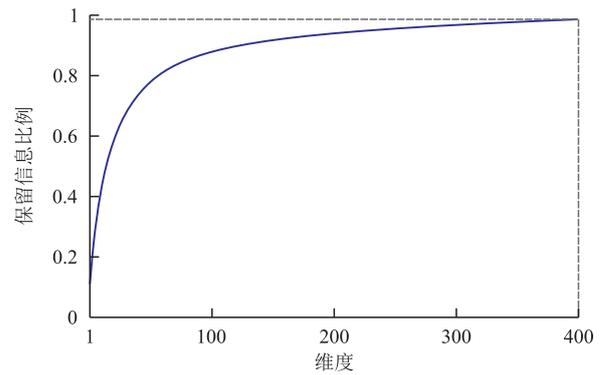


图4 数据降维后保留信息比例与维度之间关系
Fig.4 Relationship between proportion of retained information and dimension after data dimension reduction

对于进化算法而言,该问题仍属于高维优化问题。

4.3 目标函数收敛效果

根据主成分分析方法降维后的低维变量,结合进化优化算法迭代寻优,不断调整模型参数以拟合历史生产数据。对比测试了4种差分进化算法,分别为DE/rand/1、DE/best/1、结合自适应变异的差分进化算法(DE-SHS)以及结合自适应变异策略与分位数变换的差分进化算法(DE-SHS-QT),4种差分进化算法的种群设为50,迭代次数设为100,每种算法独立运行5次进行对比。差分进化算法中的F设为0.5,CR设为0.5。

由图6可以看出,随着种群迭代次数增多,使用4种算法均可使目标函数下降。其中,使用DE/rand/1算法的目标函数收敛最早,但目标函数值最高。与DE/rand/1算法相比,DE/best/1算法具有更好的

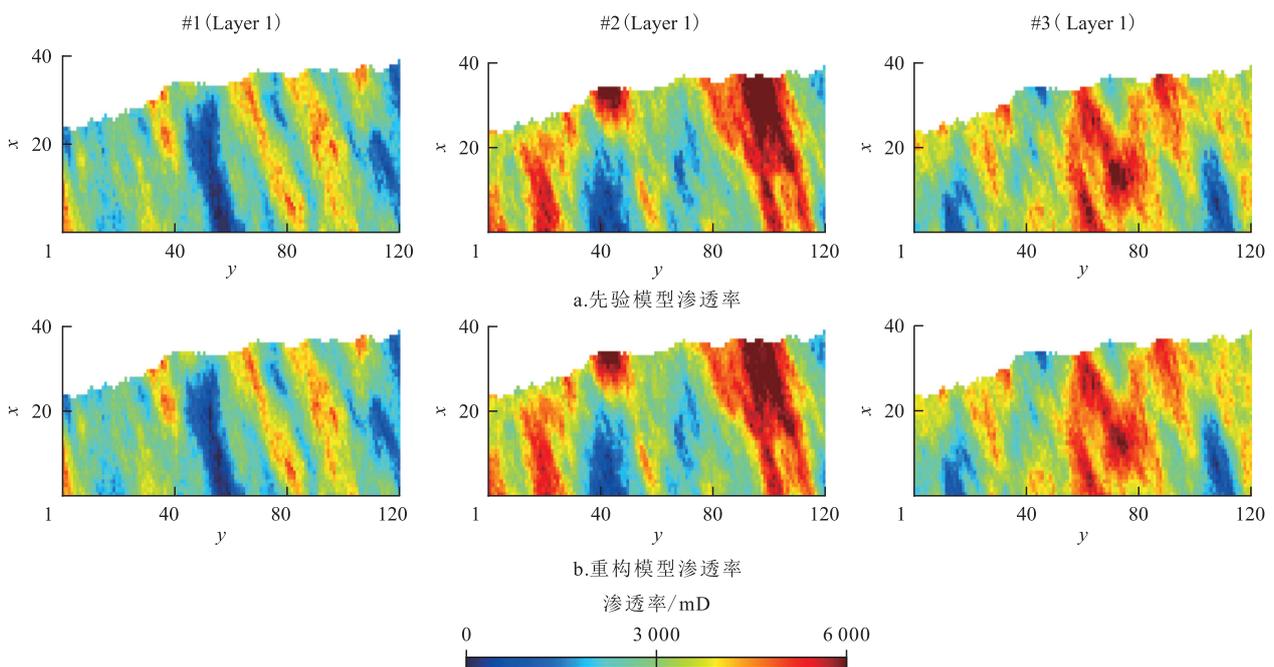


图5 先验模型渗透率以及参数降维重构效果

Fig.5 Permeability of prior model and reconstruction effect after parameter dimension reduction

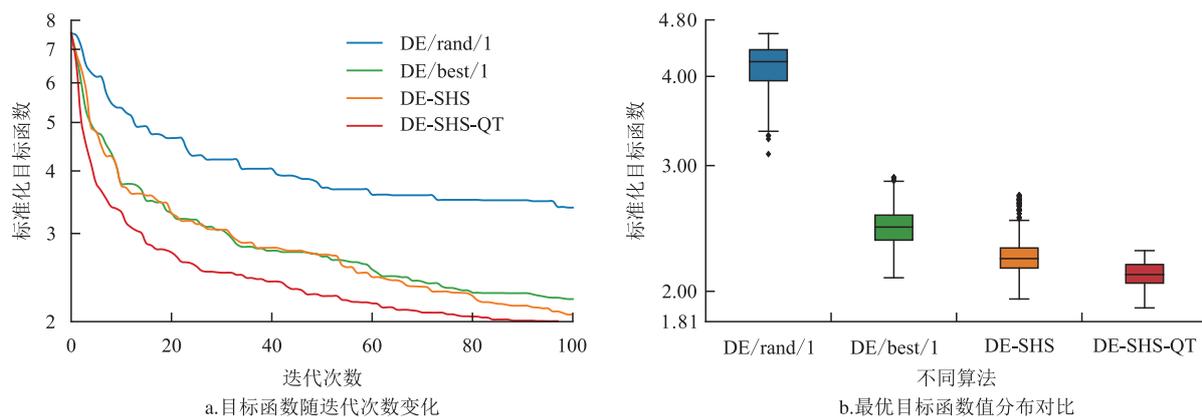


图6 自动历史拟合目标函数收敛效果
Fig.6 Convergence effect of objective function of automatic history matching

收敛效果。当结合自适应变异策略后,相比于两种基础的差分进化算法(DE/rand/1与DE/best/1),DE-SHS算法收敛性更好。结合分位数变换后,DE-SHS-QT算法的收敛性最好。

图6b展示每种算法运行获得的50个最优解的分布情况(5次独立运行则为250个值),由此可以看出,DE-SHS-QT算法获得的最优解目标函数最小。4种算法获得的最优目标函数值的平均值与标准差如表1所示。对于50个最优目标函数的平均值,DE-SHS-QT算法相比于DE/rand/1算法、DE/best/1算法和DE-SHS算法分别降低48.77%、14.24%和6.70%。对于最优目标函数的标准差,DE-SHS-QT算法获得的标准差最小。测试结果表明,在该高维问题上,2种传统的差分进化算法均存在着收敛停滞的问题,而改进的差分进化算法提升了目标函数的收敛效果。

4.4 模型参数分布

对比DE-SHS-QT算法与DE-SHS算法的结果发现,结合分位数变换后,算法的收敛效果有一定

表1 最优目标函数平均值与标准差

Table 1 Mean and standard deviation of optimal objective function

指标	DE/rand/1	DE/best/1	DE-SHS	DE-SHS-QT
平均值	4.135	2.470	2.270	2.118
标准差	0.294	0.166	0.178	0.083

提升,其中主要原因在于分位数变换约束了种群中每个个体变量的分布情况,更加符合标准正态分布,因而计算出的模型参数的先验误差更小。图7展示算法迭代更新之后种群中模型参数的前3个特征分布情况,这3个特征均为使用主成分分析方法降维后的特征。可以看出,结合分位数变换方法,更新的模型变量分布更接近标准正态分布。

4.5 数据拟合效果

图8与图9展示DE-SHS-QT算法获得的最优模型的数据拟合效果。其中,灰色范围表示先验模型的生产数据(P10—P90),绿色表示100个最优模型的生产数据(P10—P90),红色点表示加了噪声的历史生产数据。可以看出,先验模型的模拟生产数据范围较大,表明模型的不确定性较强,而经过历史

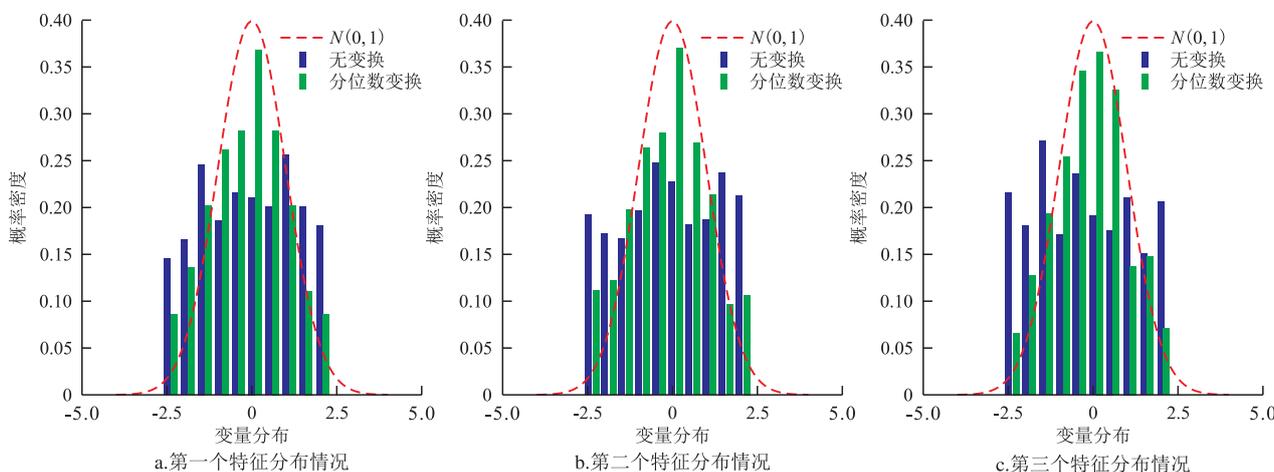


图7 分位数变换方法约束更新后的模型参数分布
Fig.7 Updated model parameter distribution by quantile transformation method

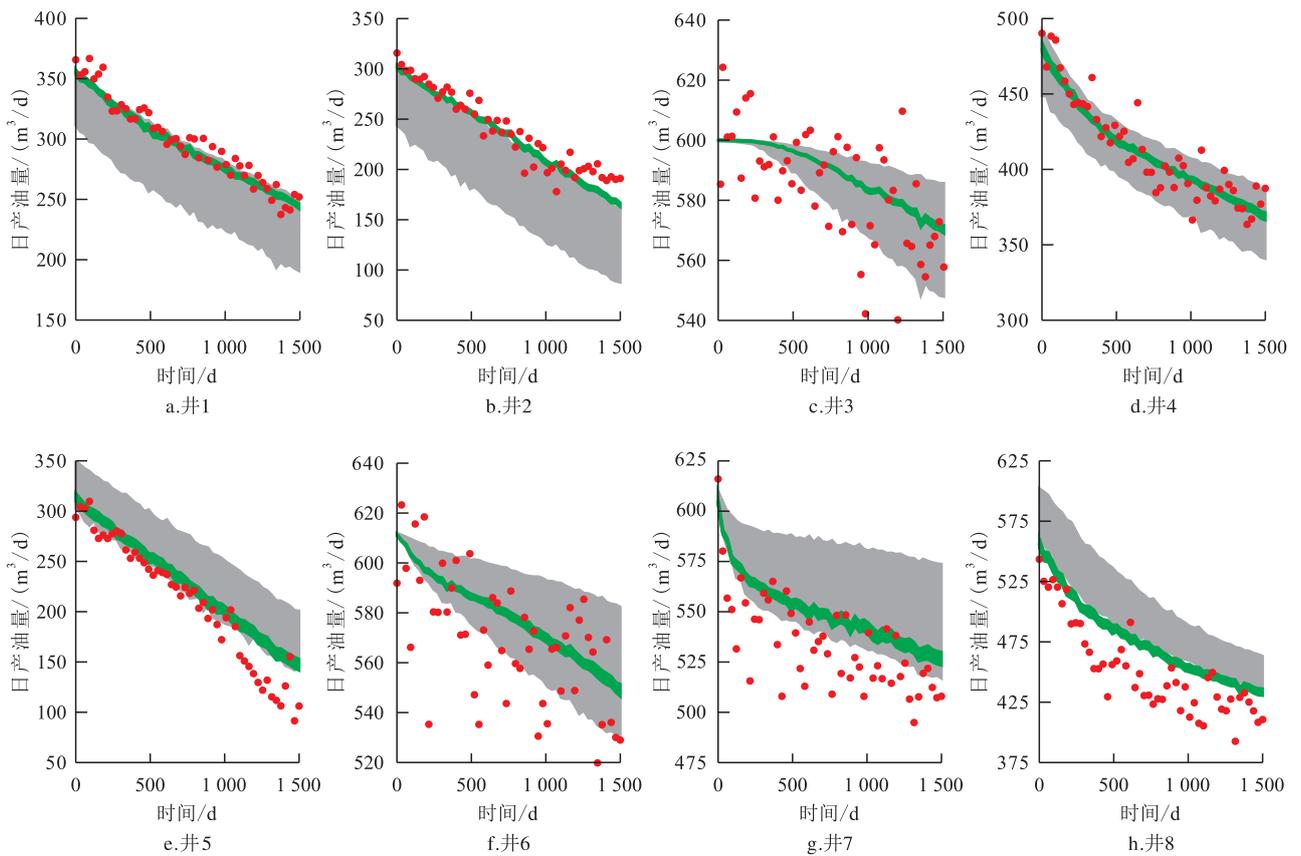


图8 最优模型日产量拟合效果

Fig.8 Matching effect of daily oil production of optimal model

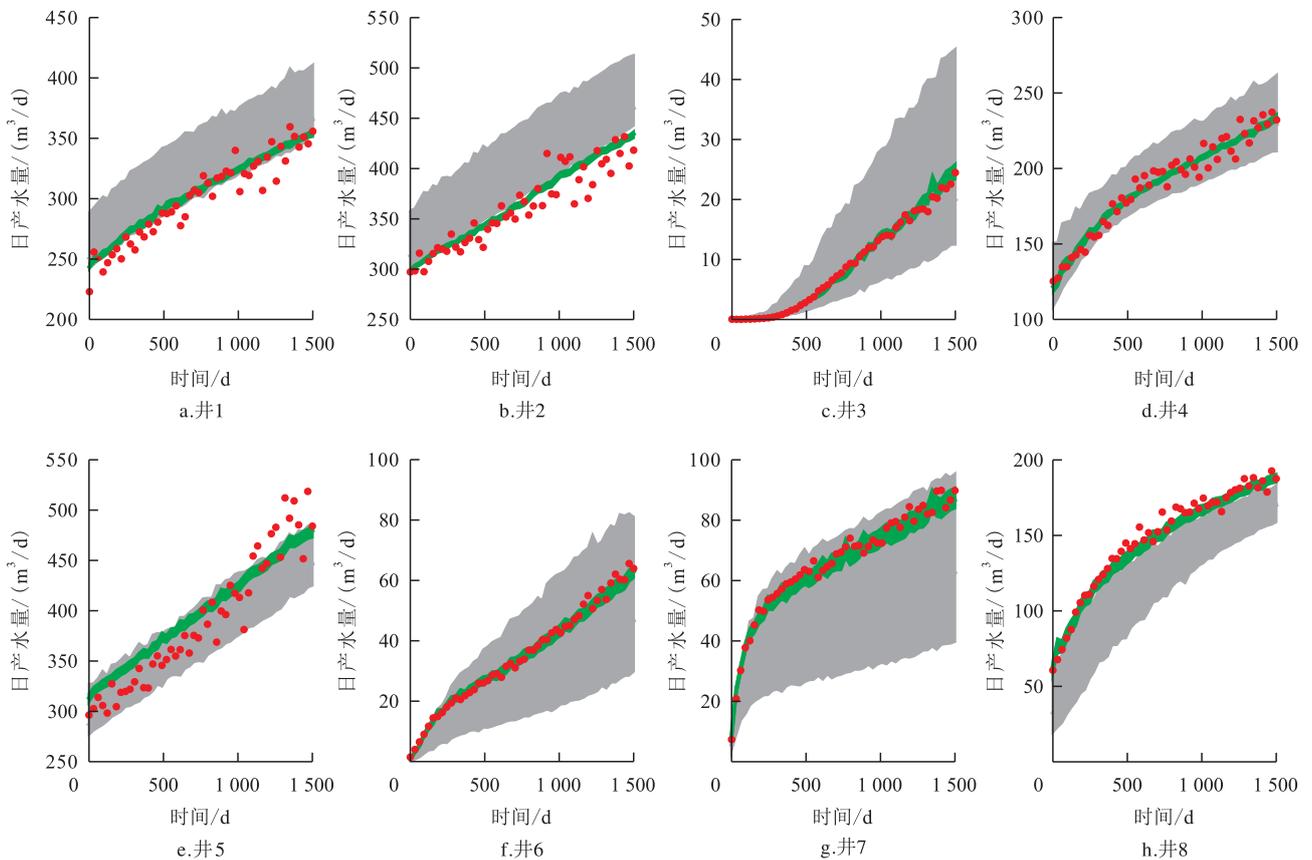


图9 最优模型日产量拟合效果

Fig.9 Matching effect of daily water production of optimal model

拟合之后,最优模型的模拟生产数据较好地拟合了历史生产数据,大大降低了数据分布的不确定性。

4.6 拟合模型结果

图10展示了反演模型与真实模型的渗透率分布对比效果。其中,图10a为真实模型的第5、10以及15层的渗透率分布情况,图10b为反演模型的渗透率平均值分布情况,图10c为反演模型的渗透率标准差分布情况。由图10可以看出,反演模型渗透率平均值与真实模型渗透率存在较大的相似性,尤

其是在每一层的高渗透、低渗透区域以及油水井附近区域,说明算法可以反演出主要的油藏参数特征。但反演模型仍与真实模型存在一定差异,这是由历史拟合多解性特点决定的,即反演模型不可能完全与真实模型一致。同时,从反演模型的渗透率标准差结果可以看出,提出算法可以反映出模型参数分布的不确定性,其中,标准差小表明反演参数确定程度较高,而标准差大表明反演参数确定程度较低。拟合模型结果展示出算法较好的应用效果。

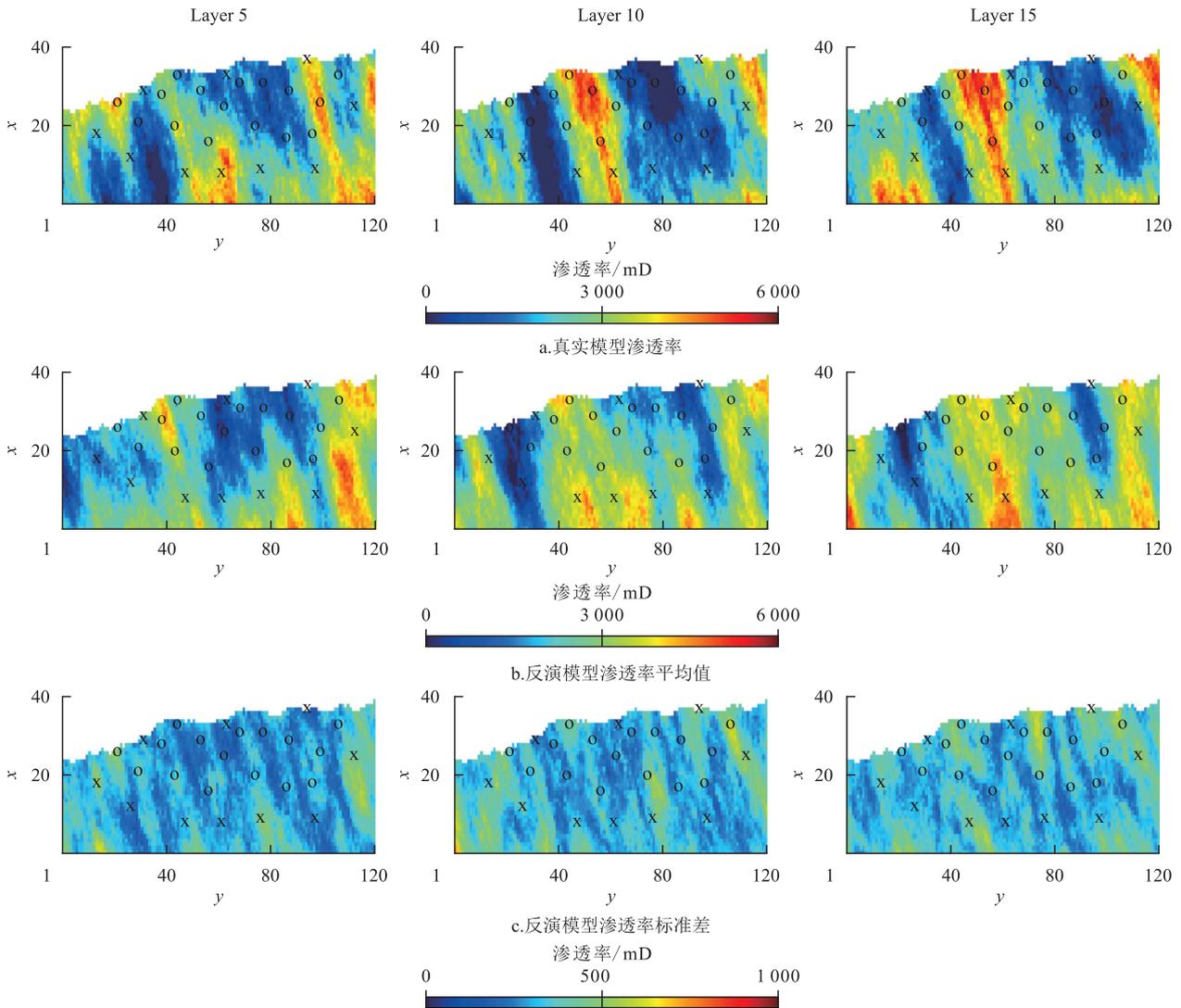


图10 反演模型与真实模型渗透率分布对比

Fig.10 Comparison between permeability distributions of inverted model and actual model

5 结论

在三维油藏实例测试中,基于主成分分析方法降维,得到400维的变量,仍属于高维优化问题。针对该问题,提出的DE-SHS-QT算法优于DE/rand/1、DE/best/1和DE-SHS算法,其算法收敛性分别提升

48.77%、14.24%和6.70%。在差分进化算法求解中,迭代更新的参数分布不符合降维后参数的分布,采用分位数变换方法可以保证更新的参数分布符合标准正态分布,使重构的油藏参数分布更加符合实际认识。并且该算法获得的模型模拟生产数据较好地拟合了历史生产数据,反演模型的参数分布接近真实模型,自动历史拟合效果显著,适用于

实际油藏模型高维参数的历史拟合过程。

参考文献

- [1] 郑昕,束青林,苏朝光,等.基于模拟退火的曲流河复合点坝建模新方法[J].断块油气田,2023,30(1):114-119,135.
ZHENG Xin, SHU Qinglin, SU Chaoguang, et al. A new modeling method of meandering river complex point bars based on simulated annealing [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(1): 114-119, 135.
- [2] 冯进,石磊,管耀,等.基于图像处理和Kozeny-Carman方程的砂岩储层渗透率预测[J].中国海上油气,2022,34(2):67-75.
FENG Jin, SHI Lei, GUAN Yao, et al. Prediction of sandstone reservoir permeability based on image processing and Kozeny-Carman equation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 67-75.
- [3] 董鹏,陈志明,于伟.压裂后页岩油藏多裂缝直井产能模型:以鄂尔多斯盆地页岩油井为例[J].大庆石油地质与开发,2022,41(1):155-165.
DONG Peng, CHEN Zhiming, YU Wei. Study on productivity model for multiple-fracture vertical well in shale oil reservoirs after fractured: A case of shale oil wells in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(1): 155-165.
- [4] 林魂,孙新毅,宋西翔,等.基于改进人工神经网络的页岩气井产量预测模型研究[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):467-473.
LIN Hun, SUN Xinyi, SONG Xixiang, et al. A model for shale gas well production prediction based on improved artificial neural network [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 467-473.
- [5] 吴昊镒,彭小龙,朱苏阳,等.砾岩油藏弓形井多级水平缝压裂聚驱采收率数值模拟[J].新疆石油地质,2022,43(1):85-91.
WU Haoqiang, PENG Xiaolong, ZHU Suyang, et al. Numerical simulation on polymer flooding recovery of conglomerate reservoirs: horizontal fractures in arched wells after multi-stage fracturing [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(1): 85-91.
- [6] 周久宁,范子菲,包宇,等.油砂多分支水平井SAGD开发规律数值模拟研究及现场开发效果评价[J].中国石油勘探,2023,28(3):145-159.
ZHOU Jiuning, FAN Zifei, BAO Yu, et al. Numerical simulation study on SAGD development law of multi-lateral horizontal oil sand wells and evaluation of field development results [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 145-159.
- [7] 邓宝荣,袁士义,李建芳,等.计算机辅助自动历史拟合在油藏数值模拟中的应用[J].石油勘探与开发,2003,30(1):71-74.
DENG Baorong, YUAN Shiyi, LI Jianfang, et al. Applying computer-aided history matching to the numerical simulation of reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 71-74.
- [8] 叶继根,吴向红,朱怡翔,等.大规模角点网格计算机辅助油藏模拟历史拟合方法研究[J].石油学报,2007,28(2):83-86.
YE Jigen, WU Xianghong, ZHU Yixiang, et al. Study on computer assisted history-matching method in corner point grids [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 83-86.
- [9] 闫霞,李阳,姚军,等.基于流线EnKF油藏自动历史拟合[J].石油学报,2011,32(3):495-499.
YAN Xia, LI Yang, YAO Jun, et al. Automatic history matching of reservoirs using the streamline-based EnKF method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 495-499.
- [10] KAZEMI A, STEPHEN K D. 油藏数值模拟自动历史拟合方法——以Nelson油田为例[J].石油勘探与开发,2012,39(3):326-337.
KAZEMI A, STEPHEN K D. Schemes for automatic history matching of reservoir modeling: A case of Nelson oilfield in the UK [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 326-337.
- [11] 刘伟,赵辉,雷占祥,等.基于单井敏感性局域化EnKF的油藏辅助历史拟合方法[J].石油学报,2019,40(6):716-725.
LIU Wei, ZHAO Hui, LEI Zhanxiang, et al. Reservoir assisted history matching method using a local ensemble Kalman filter based on single-well sensitivity region [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(6): 716-725.
- [12] SHAMS M, EL-BANBI A, SAYYOUH H. 和声搜索优化算法在油藏工程辅助历史拟合中的应用[J].石油勘探与开发,2020,47(1):148-154.
SHAMS M, EL-BANBI A, SAYYOUH H. Harmony search optimization applied to reservoir engineering assisted history matching [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 148-154.
- [13] 苏旭.聚合物驱多参数数值模拟自动历史拟合方法[J].油气地质与采收率,2022,29(5):102-110.
SU Xu. Automatic history matching method for multi-parameter numerical simulation of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 102-110.
- [14] 张道伟,戴城,陈硕思,等.考虑多尺度裂缝表征的致密油藏CO₂吞吐智能历史拟合[J].油气地质与采收率,2022,29(1):160-167.
ZHANG Daowei, DAI Cheng, CHEN Shuosi, et al. Intelligent history matching of CO₂ huff-n-puff in tight oil reservoirs considering multi-scale fracture characterization [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 160-167.
- [15] HAMDI H, BEHMANESH H, CLARKSON C R, et al. Using differential evolution for compositional history-matching of a tight gas condensate well in the Montney Formation in western Canada [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 1317-1331.
- [16] SANTHOSH E C, SANGWAI J S. A hybrid differential evolution algorithm approach towards assisted history matching and uncertainty quantification for reservoir models [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 142: 21-35.
- [17] 张鲜,AWOTUNDE A A. 油藏模拟历史拟合中Levenberg-Marquardt算法的改进[J].石油勘探与开发,2016,43(5):806-815.
ZHANG Xian, AWOTUNDE A A. Improvement of Levenberg-

- Marquardt algorithm during history fitting for reservoir simulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 806-815.
- [18] MA X, ZHANG K, ZHANG L, et al. Data-driven niching differential evolution with adaptive parameters control for history matching and uncertainty quantification [J]. *SPE Journal*, 2021, 26(2): 993-1 010.
- [19] 凡玉梅. 未开发油气储量不确定性潜力评价方法[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(6): 1 100-1 104.
FAN Yumei. Evaluation method for uncertain potential of undeveloped reserves [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(6): 1 100-1 104.
- [20] 乐平, 屈思敏, 李丰辉, 等. 高孔高渗高含水稠油油藏剩余油分布特征及动用的主控因素[J]. *非常规油气*, 2023, 10(2): 33-42.
YUE Ping, QU Simin, LI Fenghui, et al. Remaining oil distribution characteristics and main controlling factors for use in high porosity, high permeability and high water cut heavy oil reservoirs [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(2): 33-42.
- [21] 汪洋, 黄延明, 同鑫, 等. 剩余油研究方法综述[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(1): 14-21.
WANG Yang, HUANG Yanming, TONG Xin, et al. Review of remaining oil research methods [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(1): 14-21.
- [22] GAVALAS G, SHAH P, SEINFELD J H. Reservoir history matching by Bayesian estimation [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1976, 16(6): 337-350.
- [23] WALL M E, RECHTSTEINER A, ROCHA L M. Singular value decomposition and principal component analysis [M]. Berlin: Springer, 2003: 91-109.
- [24] BERTOLINI A C, SCHIOZER D J. Principal component analysis for reservoir uncertainty reduction [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2016, 38(4): 1 345-1 355.
- [25] VO H X, DURLOFSKY L J. A new differentiable parameterization based on principal component analysis for the low-dimensional representation of complex geological models [J]. *Mathematical Geosciences*, 2014, 46(7): 775-813.
- [26] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art [J]. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2010, 15(1): 4-31.
- [27] PRICE K V. *Differential evolution* [M]. Berlin: Springer, 2013: 187-214.
- [28] GUO S M, YANG C C, HSU P H, et al. Improving differential evolution with a successful-parent-selecting framework [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2015, 19(5): 717-730.
- [29] BOGNER K, PAPPENBERGER F, CLOKE H L. Technical note: the normal quantile transformation and its application in a flood forecasting system [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(4): 1 085-1 094.
- [30] MANZOCCHI T, CARTER J N, SKORSTAD A, et al. Sensitivity of the impact of geological uncertainty on production from faulted and unfaulted shallow-marine oil reservoirs: objectives and methods [J]. *Petroleum Geoscience*, 2008, 14(1): 3-15.
- [31] MATTHEWS J D, CARTER J N, STEPHEN K D, et al. Assessing the effect of geological uncertainty on recovery estimates in shallow-marine reservoirs: the application of reservoir engineering to the SAIGUP project [J]. *Petroleum Geoscience*, 2008, 14(1): 35-44.

编辑 单体珍