

# 油藏自动历史拟合研究进展

王鸣川, 段太忠, 孙红军, 张俊法

中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 油藏自动历史拟合自提出至今已有 50 余年的历史, 在理论和应用研究方面都取得了长足进展。为总结油藏自动历史拟合领域的研究进展和关键技术, 以油藏自动历史拟合的发展历程为主线, 以油藏自动历史拟合的技术进展为核心, 将油藏自动历史拟合分为萌芽、形成、发展和快速发展 4 个阶段, 讨论了常用的优化方法和具有发展潜力的优化算法, 对比了各优化算法的特点和适用范围, 探讨了目前研究存在的问题, 提出了油藏自动历史拟合的发展方向。

**关键词** 自动历史拟合; 目标函数; 优化算法; 辅助历史拟合方法

建立可靠的地质模型是解决油藏评价、管理、开发难题的基础, 也是油藏和油井动态预测的保证。油藏定量地质建模对资料的数量和质量要求高, 同时对建模人员的知识和经验要求高, 而且建模过程不确定性因素多且复杂, 导致地质模型与真实油藏存在差异。因此, 地质模型需要根据已有资料, 特别是动态资料, 对其进行修正, 使其无限接近真实油藏。相对于静态资料, 动态资料包含了重要的基于生产响应的地质信息, 能够更全面、更准确地评价地质模型。动态数据通过与地质模型计算的结果进行对比(历史拟合)来评价地质模型与真实油藏之间的差异。目前普遍采用动态历史拟合的方法进行地质模型的修正和优化。

自动历史拟合是通过计算机, 采用优化算法, 自动调整油藏模型参数, 使油藏模型尽可能地重现油藏历史动态的过程。其基本原理为: 构建一个反映油藏模型计算值与实际观测值偏差的目标函数, 通过优化算法, 自动寻找最优油藏参数, 最小化目标函数。自动历史拟合利用少量(相对于模型网格)的动态观测数据, 求解模型中大量的未知参数, 是一种典型的反问题, 具有多解性。自动历史拟合目的是降低不确定性参数的不确定度, 使地质模型不断逼近真实油藏, 从而获得较为可靠的地质模型。

## 1 历史拟合发展历程

### 1.1 概述

历史拟合按其发展过程与实现方法, 可分为人工历史拟合和自动历史拟合两大类。人工历史拟合就是“试错”(trial and error), 即油藏工程师根据数值模拟的计算值与实际油藏观测值之间的差距, 人工分析、修改一个或多个油藏参数以减小历史拟合误差<sup>[1-2]</sup>。实际油藏往往非均质性、参数多,

而高精度油藏模型网格数巨大, 人工历史拟合不仅带有很强的主观性, 而且费时费力, 对于长期开发的大型油藏显得无能为力。因此, 计算机和优化算法被引入用来自动调整油藏参数, 逐渐形成了自动历史拟合技术。虽然使用计算机进行历史拟合早在 20 世纪 50 年代已经开始, 但具有“自动”意义的历史拟合于 20 世纪 60 年代中期才开始出现<sup>[3, 4]</sup>。自动历史拟合方法主要包括目标函数和优化算法两个部分。

图 1 总结了从 20 世纪 70 年代起 SPE、CNKI 和 WOK(web of knowledge)三大数据库历年来历史拟合主题的文献数量。从图中可以看出, 关于历史拟合的研究论文呈现逐年上升的趋势; 每当计算机能力提高或数学算法出现进步时, 都会迎来历史拟合研究的小高潮。研究者对历史拟合的研究兴趣不断增加, 研究能力不断提高, 自动历史拟合的应用也由初期的小规模简单模型发展到后来的三维三相大规模复杂模型, 如图 2 所示(据 Oliver 和 Chen<sup>[5]</sup>)。

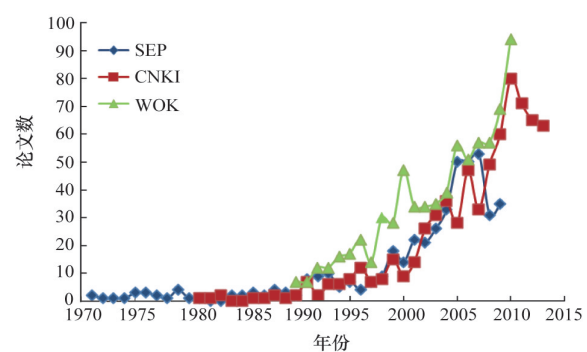


图 1 历年三大数据库关于历史拟合主题的论文数量  
Fig. 1 Numbers of paper on history matching in three major databases over the years

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2016-03-28

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05031-003); 中国石化科技部重大专项(G5800-15-ZS-KJB016)

作者简介: 王鸣川, 工程师, 研究方向为储层建模和油藏数值模拟, 电子邮箱: wang\_mingchuan@126.com

引用格式: 王鸣川, 段太忠, 孙红军, 等. 油藏自动历史拟合研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 236-245; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.032

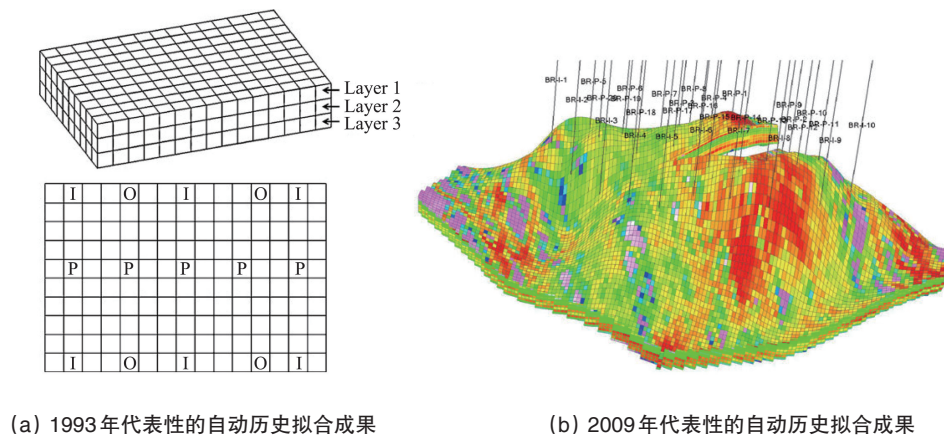


图2 自动历史拟合发展对比

Fig. 2 AHM development

## 1.2 发展历程

1965年, Jacquard等<sup>[3]</sup>首次采用回归分析代替“试错”, 利用电模型类比油藏模型, 将油藏分解成多个非均质块, 不断改变块上的属性, 直到压力观测值和计算值的最小二乘拟合达到最小, 开创了自动历史拟合研究的先河。但由于缺乏使用该方法的经验和当时电脑性能的限制, 作者没有考虑该技术的可行性。Jahns<sup>[6]</sup>利用目标函数与参数变化率对最小二乘导出的线性问题进行求解, 得到参数的更新值, 并建议采用回归分析方法对模型参数进行更正。Coats等<sup>[7]</sup>引入了参数值随机选取方法, 采用线性规划求解, 避免了参数的更新值出现负值的情况。Slater等<sup>[8]</sup>根据前人方法的优点, 采用混合方法对模型参数进行更新, 既按照costs的线性规划方法对参数更新进行求解, 同时在某个方向上改变参数使其最近区域的目标函数最小。

1972年Thomas等<sup>[9]</sup>率先解决了隐含参数变化的最小二乘线性方程问题, 循环使用参数的更新值进行数值模拟, 直到最小二乘误差达到最小。1965—1972年是自动历史拟合研究的萌芽阶段, 这个时期, 自动历史拟合采用摄动理论, 对油藏模型(包括传导率、储藏系数、网格等)进行任意的分区<sup>[3,6-8,10-11]</sup>, 通过最小二乘法进行多次回归解决问题, 并把问题看作调整非线性形式或非线性规划问题, 解法的稳定性难题没有得到很好的处理, 只能应用于单相简单模型。

1973年, Chen等<sup>[12]</sup>采用最优控制理论对之前基于梯度的历史拟合方法进行了改进, 将历史拟合问题作为最优控制问题处理, 并将油藏属性作为位置的连续函数而非离散的区域值, 历史拟合所需计算时间大幅减少。Wasserman等<sup>[13]</sup>运用Chen等提出的方法, 对拟多相问题进行了研究, 显示了最优控制理论对多相流体模型的广泛实用性。Chavent等<sup>[14]</sup>扩展了最优控制历史拟合方法的研究, 进一步验证了运用最优控制理论进行自动历史拟合的优点, 并且发现最优控制理论能避免非真实的参数值。Gavalas等<sup>[15]</sup>首次将贝叶斯理论用于油藏自动历史拟合, 用贝叶斯估计代替分区, 并使用未知参

数的先验统计信息, 使历史拟合问题在统计意义上变得更加容易确定。但是, 如果参数和测量误差不是正态分布, 模型与参数之间不是线性关系, 贝叶斯估计的严格执行将会变得极端冗长繁琐, 因此极少使用。而且, 文内并未摆脱梯度方法的痕迹。Bosch等<sup>[16]</sup>研究了不可压缩油水两相流自动历史拟合, 将单相自动历史拟合扩展到两相自动历史拟合阶段。Watson等<sup>[17]</sup>基于最优控制理论对两相油藏孔隙度渗透率的空间分布, 以及相对渗透率函数系数进行了估计。Tang等<sup>[18]</sup>采用GPST(广义脉冲频谱技术)对二维单相微可压缩线性模型进行了压力自动历史拟合, 并声称该方法对二维两相非线性系统同样适用。Agarwal等<sup>[19]</sup>利用回归技术结合动态选取参数方法拟合流体的相行为和状态方程参数。MacMillan<sup>[20]</sup>采用标准的自动历史拟合技术对微观水驱实验中的相对渗透率曲线进行了拟合。Yang等<sup>[21]</sup>采用变尺度方法对最优控制理论自动历史方法进行了改进。Tan等<sup>[22-23]</sup>扩展了非线性回归方法的研究, 将自动历史拟合扩展到三维三相模型。

1973—1992年为自动历史拟合研究的形成阶段。前期的方法, 例如非线性回归方法、梯度方法和高斯-牛顿方法, 得到进一步的改进和完善; 计算过程中需要的敏感系数计算方法也得到了重视和发展, 逐步形成了一套自动历史拟合阶段性“标准方法”。另外, 最优控制理论也被引入, 并逐渐发展完善, 形成了以最优控制理论为基础的新的阶段性自动历史拟合“标准方法”。同时, 自动历史拟合所适用的模型从初期的一维单相油藏模型发展到三维三相油藏模型。

1993年, Ouenes等<sup>[24-25]</sup>将模拟退火算法应用于自动历史拟合过程, 提高了全局最优解的可靠性。Sen等<sup>[26]</sup>将遗传算法引入自动历史拟合过程, 并对比了3种基于混合优化过程的不同算法的区别, 生成了渗透率随机分布场。高惠民<sup>[27]</sup>利用Powell方法反求地层参数, 并对比了3种不同方法的效果。王曙光等<sup>[28]</sup>将非线性规划方法——Nelder-Mead单纯形法应用于油藏自动历史拟合中, 取得了较好的效果。Schiozer等<sup>[29]</sup>在直接优化算法中应用并行计算提高计算速度。Gomez等<sup>[30]</sup>

引入隧道算法将梯度类局部寻优扩展到全局寻优。Schulze-Riegert 等<sup>[31]</sup>采用稳定性好、对非线性和非连续性不太敏感的进化算法进行自动历史拟合,实际应用表明这种方法在早期建模中应用效果很好。

1993—2002 年为自动历史拟合研究的发展阶段。随着对自动历史拟合研究的深入,除了对(非)线性回归、最优控制、基于贝叶斯估计的自动历史拟合方法进行探讨、改进和完善,越来越多的方法被引入进行历史拟合。自动历史拟合的基本方法由直接方法和梯度类方法向随机方法和智能算法演变,逐步形成了一批启发式自动历史拟合方法。

Naevdal 等<sup>[32]</sup>于 2002 年将集合卡尔曼滤波方法(ENKF)引入石油工程领域,Liu 等<sup>[33-34]</sup>在沉积相边界拟合方面对集合卡尔曼滤波方法展开了研究。Zhang 等<sup>[35]</sup>对贝叶斯估计自动历史拟合进行了实例研究和讨论。Gao 等<sup>[36]</sup>利用同步扰动随机近似法拟合多相流模型,同步扰动迭代步中的每个参数,生成搜索方向。Williams 等<sup>[37]</sup>利用 BP 公司研制的进化算法软件(TDRM)进行油藏参数估计,提高速度达 20%。Sahni 等<sup>[38]</sup>引入小波进行自动历史拟合,与之前的自动历史拟合算法不同,该方法不仅保证了拟合后模型的一致性,而且包含了产量数据的不确定性。Cullick 等<sup>[39]</sup>对比了两种自动历史拟合流程(直接在模型上和通过神经网络替代模型)更新油藏和井参数的效果,发现通过替代模型,能提高自动历史拟合效率和稳定性。Haugen 等<sup>[40]</sup>和 Zafari 等<sup>[41]</sup>扩展了集合卡尔曼滤波在自动历史拟合研究中的应用,取得了可喜的成果。Kazemi 等<sup>[42]</sup>和闫霞等<sup>[43]</sup>利用流线模拟代替传统的油藏模拟器,大大改善了模拟的速度。Hajizadeh 等<sup>[44]</sup>引入蚁群优化算法对历史拟合问题进行研究,证明蚁群优化算法在高维度复杂油藏历史拟合中比其他方法具有更好的效果。在各种新的算法不断引入到自动历史拟合中的同时,各种混合算法也不断出现。如概率与集合卡尔曼滤波混合<sup>[45]</sup>、全局和局域优化算法混合<sup>[46]</sup>。另外,基于改进之前各种算法的优化算法也不断涌现<sup>[47-51]</sup>。

2003 年至目前是自动历史拟合研究的快速发展阶段。随机方法和智能算法越来越多地用于动态地质建模中。发展了一批更具希望的自动历史拟合算法,如集合卡尔曼滤波方法以及各种混合算法。随着人们对油气藏建模精度和不确定性认识的提高,单一的“拟合好”的模型已经不能满足需要,自动历史拟合技术朝着同时产生多个“拟合好”模型的方向发展。同时,为了提高大规模复杂地质模型的自动历史拟合速度,发展和完善了多种辅助自动历史拟合方法。

## 2 目标函数

目标函数定义为模型计算值与实际观察值之间的差距,一般由多个动态数据的目标函数加权构成。目标函数的确定和选取依赖于可以得到的观察数据,对自动历史拟合的效率至关重要。目前比较常用的目标函数如表 1<sup>[5, 52-53]</sup>。

表 1 目标函数

Table 1 Objective functions

目标函数	描述	表达式
SE	简单误差	$SE = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - s_{ji} )$
NE	标准化误差	$NE = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - s_{ji} )}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - b_{ji} )}$
WNE	加权标准化误差	$WNE = \frac{\sum_{j=1}^m w s_j \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - s_{ji} )}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - b_{ji} )}$
DWNE	动态加权标准化误差	$DWNE = \frac{\sum_{j=1}^m w s_{Dj} \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - s_{ji} )}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ( h_{ji} - b_{ji} )}$
S <sub>q</sub> E	平方差	$S_q E = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ji} - s_{ji})^2$
NS <sub>q</sub> E	标准化平方差	$NS_q E = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ji} - s_{ji})^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ji} - b_{ji})^2}$
WNS <sub>q</sub> E	加权标准化平方差	$WNS_q E = \frac{\sum_{j=1}^m w q_j \sum_{i=1}^n (h_{ji} - s_{ji})^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ji} - b_{ji})^2}$
DWNS <sub>q</sub> E	动态加权标准化平方差	$DWNS_q E = \frac{\sum_{j=1}^m w q_{Dj} \sum_{i=1}^n (h_{ji} - s_{ji})^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ji} - b_{ji})^2}$

## 3 优化算法

尽管目标函数具有某种程度的相似性,但是对目标函数最小化的优化算法差异巨大。

### 3.1 梯度类方法

当目标函数足够光滑时,梯度类方法是局部寻优的最有效方法。梯度类方法由于直观简单、收敛性相对较好,较早应用于实际油藏的自动历史拟合,也是最为常用的优化算法。梯度类方法在求取目标函数最小值时,首先需要计算目标函数对于模型变量的导数,即敏感系数,进而求得目标函数的梯度。如果不能有效快速求取敏感性参数,将导致梯度类算法计算时间大大增加,使得梯度类方法较快收敛性的优势大打折扣。

1) 敏感系数求解方法。敏感系数为目标拟合量(如压力、产量等)对于模型变量(孔隙度、渗透率等)的导数,如果用  $g(m) = [g_1(m), g_2(m), \dots, g_{N_d}(m)]^T$  来代表目标拟合量与模型变量之间的关系,那么,敏感系数矩阵为:

$$G = (\nabla_m g^T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial m_{N_m}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{N_d}}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial g_{N_d}}{\partial m_{N_m}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $N_d$  为目标拟合量的数量,  $N_m$  为模型变量  $m$  的数量。敏感系数矩阵  $G$  的计算方法主要有 3 种: 有限差分法、敏感方程法和伴随法。

(1) 有限差分法。有限差分法利用差分格式直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法, 数学概念直观, 表达简单。在有限差分法中, 敏感系数计算方法为:

$$\frac{\partial g_j}{\partial m_k} = \frac{g_j(m_1, \dots, m_k + \Delta m_k, \dots, m_{N_m}) - g_j(m_1, \dots, m_k, \dots, m_{N_m})}{\Delta m_k} \quad (2)$$

式中,  $k=1, 2, \dots, N_m$ 。采用有限差分法计算敏感系数需要  $N_m$  个评价方程。当模型规模和变量较少时, 有限差分法不失为一种较好的方法。

(2) 敏感方程法。Anterion 等<sup>[54]</sup>首次将敏感方程法用于自动历史拟合的敏感性参数中。Bissell 等<sup>[55]</sup>应用敏感方程法计算了历史拟合中的敏感系数。

假设模型变量  $m$  (如孔隙度、渗透率等) 和状态变量  $s$  (如产量、压力等) 满足方程:

$$f(m, s) = 0 \quad (3)$$

那么, 状态变量对模型变量  $m_k$  的敏感参数方程为:

$$(\nabla_s f)^T \frac{\partial s}{\partial m_k} + (\nabla_m f)^T \frac{\partial m}{\partial m_k} = 0 \quad (4)$$

因此, 可以得到计算量对模型变量  $m_k$  的敏感性方程:

$$\frac{dg}{dm_k} = (\nabla_s g)^T \frac{\partial s}{\partial m_k} \quad (5)$$

式中,  $\frac{\partial s}{\partial m_k}$  由方程(4)确定。假设状态变量  $s$  已由方程(3)求得, 那么敏感系数就确定了, 并且方程是线性的。

(3) 伴随法。当面对实际油藏历史拟合中庞大的模型规模和变量时, 有限差分法由于计算量大, 计算效率急剧降低, 而伴随法是目前梯度类方法中计算敏感系数最有效的方法。

伴随状态变量可以理解为表征油藏变量重要性的指标, 是系统方程在观测变量位置和时间点处的解。伴随状态变量沿着对观测变量有贡献的属性方向及时进行反向传播, 从而得到敏感系数。Jacquard 等<sup>[3]</sup>于 1965 年首次运用近似伴随法对二维单相瞬态流模型进行了历史拟合, 但作者采用电阻和电容的概念来描述该方法。Chen 等<sup>[12]</sup>和 Chavent 等<sup>[14]</sup>也采用了伴随法对基于梯度的最优控制问题进行求解。因为伴随系统是线性的, 所以比起非线性的流动和运移方程, 其求解的速度要快得多。Li 等<sup>[56]</sup>注意到, 对三相流动来说, 伴随方程的建立和求解非常困难, 伴随状态变量矩阵可以从全隐式油藏模拟器的每个时间步的最后一个牛顿迭代提取。

2) 梯度类方法。闫霞等<sup>[57]</sup>根据梯度类算法对目标函数求导的同时, 是否需要 Hessian 矩阵进行求解, 将梯度类算法分为一次导数法和二次导数法。为了讨论的方便和系统性, 本文按照各类方法的使用频率和广泛性对各类梯度类方法进行讨论。

高斯牛顿(Gauss-Newton)法使用泰勒级数展开式近似代替非线性模型, 通过多次迭代使目标函数达到最小。高斯牛

顿法的优点是收敛速度非常快(通常只需要 8~10 个迭代步), 但整体收敛性差, 不仅依赖于初始点的选取, 而且每个迭代步都需要计算敏感系数<sup>[58]</sup>。列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt)法<sup>[56, 59]</sup>对高斯牛顿法中的 Hessian 矩阵进行了修改, 提高了收敛速度, 避免了算法对步长的评估。列文伯格-马夸尔特法巧妙地在最速下降法和牛顿法之间进行平滑调和, 远离极小值时采用最速下降法保证整体收敛性, 接近极小值时切换到牛顿法加快收敛速度, 并在高斯牛顿法的迭代步中引入了阻尼系数  $\lambda$ , 当  $\lambda$  很大时, 该方法几乎与最速下降法等价, 当  $\lambda$  趋近于零时, 退化到牛顿法, 通过调节  $\lambda$  值灵活切换算法, 扩大了算法的实用范围, 提高算法的收敛性及收敛速度。但当  $\lambda$  很小时, 需要多次反复调整  $\lambda$  的大小, 才能使目标函数值下降。对此, Levenberg-Marquardt-Fletcher (LMF)法迭代过程中用目标函数值的实际减小量与假定目标函数为二次函数时预期减小量之比来调整。

共轭梯度(conjugate gradient)法<sup>[12, 15]</sup>或拟牛顿(quasi-Newton)法<sup>[60]</sup>仅需要计算目标函数的梯度, 收敛速度比高斯牛顿法慢很多, 但是对于大型的历史拟合问题, 在总的计算时间上往往比高斯牛顿法更有效。共轭梯度法的搜索方向彼此共轭, 下一个搜索方向是当前残余和前期搜索方向的线性组合, 收敛速度比最速下降(steepest descent)法<sup>[12]</sup>快, 但计算时间几乎不增加<sup>[61]</sup>。在所有梯度类方法中, 对解决具有大量模型变量和大量拟合数据的历史拟合问题, 拟牛顿法似乎最为成功<sup>[5]</sup>。拟牛顿法通常基于模型变量的先验协方差矩阵或方差的对角矩阵, 以 Hessian 逆矩阵的一个粗略的初始近似开始, 逐步提高 Hessian 逆矩阵在每个迭代步的估计值。在实际的使用中, 虽然 Hessian 矩阵很庞大, 但拟牛顿法不产生或保存 Hessian 矩阵, 因而计算效率相对较高。随后, 一些方法的引入, 主要为 DFP 法和 BFGS 法, 大大提高了拟牛顿法的效率。DFP 存在着数值稳定性不够理想等缺陷, 而 BFGS 校正矩阵有一定的改进, 具有较好的数值稳定性<sup>[57]</sup>。通常, 有限存储 BFGS 法对计算机存储空间要求低, 并且对高度非线性问题具有较好的收敛性。Zhang 等<sup>[62]</sup>对比了列文伯格-马夸尔特法、预处理共轭梯度法、BFGS 和有限存储 BFGS 几种优化方法在不同复杂程度的历史拟合问题中的应用后发现, 扩展对 BFGS 和有限存储 BFGS 的收敛性具有重大影响, 扩展的有限存储 BFGS 算法比高斯-牛顿法或改进的列文伯格-马夸尔特法快几倍, 尤其在大型历史拟合问题的计算上。由于拟牛顿法的高效性, 该方法被多位研究者用于各自的研究中。

### 3.2 进化算法

进化算法是受到生物演化启发而发展起来的一种基于群体的优化算法。与传统的优化算法相比, 进化算法是一种更稳定、适用性更广的全局优化算法。在自动历史拟合中, 进化算法通常采用单个油藏模型的突变和重组来产生新的油藏模型, 并由基于数据不吻合度的适应度函数来决定新模型是否可以成为合格的油藏储备模型。进化算法最常见的

两种形式是遗传算法和进化策略。

遗传算法采用随机均匀取样方法,通过参数突变和变量的重新组合,随机地产生一些个体组成初始群体,按照适应度函数规则化后的适应度值,确定下一代幸存的个体,接着计算出各个体的适应度,产生进化后的下一代群体。如此反复,不断地向更优解的方向进化,最后得到最适应问题环境的群体,从而获得问题最优解。遗传算法具有全局收敛性,是一种不用梯度信息的优化方法,特别适用于大型的组合优化问题。Romero和Carter应用遗传算法对一个复杂的合成模型进行了模型参数优化,结果显示,应用遗传算法的效果比应用模拟退火算法的效果好,接近人工历史拟合的效果<sup>[63]</sup>。另外一些自动历史拟合的结果表明,遗传算法相对更稳定,但计算速度慢,可能会出现过早收敛的情况,需要与其他优化方法结合形成性能更好的混合算法<sup>[26, 64]</sup>。进化策略与遗传算法类似,但是进化策略为自适应的优化方法,可以在目标函数最小值邻域取得收敛。进化策略在浮点矢量上进行计算,而遗传算法一般在二进制矢量上计算。Schulze-Riegert等<sup>[31]</sup>在多目标并行优化环境下,应用进化策略算法对合成模型进行了历史拟合,经过10代进化,目标函数的值降低了70%,发现搜索步长对最终的优化值影响较大。Perez等<sup>[65]</sup>根据进化策略的算法特点,将其应用于墨西哥一个裂缝性油藏的历史拟合中,发现进化策略算法不仅比传统算法少用75%的历史拟合时间,而且经进化策略优化后的油藏模型也比传统算法优化后的模型更加可靠。

尽管进化算法与其他启发式算法的兼容性好、稳定性高,但是其收敛速度慢,严重阻碍了进化算法在油藏自动历史拟合中的应用。因此,Schulze-Riegert等采用降维的方式(如合并相关的模型参数、忽略非重要参数、利用趋势参数对)来提高进化算法的收敛速度<sup>[31, 66]</sup>。另外,梯度类方法被用来提高局部收敛速度的效果也很好<sup>[66]</sup>。

### 3.3 人工神经网络

人工神经网络(ANN)与其他机械的优化方法有本质不同,它不是按给定的程序一步步执行运算,而是能够自身适应环境、总结规律,完成某种运算、识别或过程控制。

ANN模拟人的形象(直观)思维,可以通过自我学习从有限、有瑕疵的油藏动静态资料中找到最优解,具有较强的非线性动态处理能力,能够较好地处理油藏自动历史拟合这样具有复杂数学关系的问题;另外,ANN并行计算能力较强,容错能力和稳定性较好。它的这些优点,可以有效“降噪”,使自动历史拟合反演过程趋于稳定,反演结果趋于合理,增加了其在自动历史拟合中的可用性和可靠性。ANN在油藏自动历史拟合中的应用主要有两种形式,一是直接最小化目标函数,二是作为油藏模拟器的替代模型<sup>[67]</sup>。ANN在自动历史拟合中的应用表明,单一的ANN优化方法存在收敛速度慢、隐层及隐层节点数因人而异等问题。近年来,ANN方法不断与其他方法结合,形成了较好的混合优化算法<sup>[51, 67-68]</sup>。

### 3.4 集合卡尔曼滤波

集合卡尔曼滤波(EnKF)方法实质上是一种Monte Carlo方法,于2002年由Naevdal引入石油工程领域<sup>[32]</sup>,能够对大量的模型变量进行优化,快速同化不同类型的数据,易于与任何油藏数值模拟器进行兼容。其集合思想为油藏参数不确定性评价提供了一种新的方法。EnKF方法缩短了计算周期,提高了运算效率;可以同时提供多个历史拟合模型,无需多个不同的初始模型重复进行历史拟合来实现不确定性分析;能通过多个油藏模型进行生产预测,且多个油藏模型的计算是相互独立的,因而适合于多核并行运算;而且可以对尽量多的模型变量,如饱和度和压力,进行标定;能够建立在任意油藏模拟器的基础上,不用进行复杂的敏感计算,因而在利用EnKF更新模型的过程中只需要模拟器的计算结果,而无需关注解的过程,便于程序的开发、调试与维护。EnKF方法由预测步和分析步组成,2个步骤不断重复,不同类型的数​​据以序贯贝叶斯方法不断被同化,模型参数与变量不断被更新,直到满足历史拟合要求。

EnKF方法被引入石油工程领域的时间较短,但发展较快、应用研究很多(表2<sup>[40, 70-77]</sup>),取得了很大进展<sup>[5, 69]</sup>。EnKF方法的自动历史拟合的质量与人工历史拟合对比研究发现<sup>[70]</sup>,EnKF方法的拟合效果较好,对于复杂油藏EnKF方法的优势更加明显。EnKF方法的优势与应用研究,使其成为梯度类方法之后更接近解决实际油藏历史拟合难题的方法。但是,囿于有限的集合规模和分析步的高斯与线性假设,在实际运用中,EnKF方法也存在一些问题:集合可变量性过度降低,同化大量独立数据的能力有限,被估参数值域超过边界值。并且,数据量越大,这些问题越突出。针对EnKF方法的不足,Zhang等<sup>[70]</sup>,Arroyo等<sup>[71]</sup>采用局部协方差集中的方法(covariance localization)同化动态数据,Skjervheim等<sup>[72]</sup>采用次级空间反演(subspace inversion)的方法同化四维地震数据。

### 3.5 混合算法

随着油藏模型规模越来越大,为了提高自动历史拟合的精度和计算效率,充分发挥各种优化方法的长处,由2种或多种优化方法耦合的混合算法逐渐应用于大型复杂油藏历史拟合中。

Gomez等<sup>[78]</sup>为解决全局优化方法的迭代速度问题,采用隧道法进行自动历史拟合,通过隧道技术在局部最优系列中得到全局最优,将梯度类方法的局部寻优扩展为全局寻优,能够持续减小目标函数值并提供一系列的可能解,是一种比较合适的实际油藏自动历史拟合方法。Schulze-Riegert等<sup>[66]</sup>根据进化算法在实际油藏历史拟合中的缺点——全局收敛速度慢,采用基于梯度的搜索方法提高自动历史拟合局部收敛速度,并在2个实例中进行测试,效果较好。Arroyo等<sup>[71]</sup>、闫霞等<sup>[43]</sup>将流线模拟方法与EnKF相结合,提出了基于流线EnKF的方法(SLEnKF),不仅加快了EnKF预测阶段的计算效率和提高拟合精度,而且能同步考虑先验信息,并在合成模型

表2 EnKF方法应用研究实例  
Table 2 Application research examples of EnKF method

研究人员	模型规模	井况	数据类型	模型参数
Skjervheim 等 <sup>[72]</sup>	29580 (14层)	5口生产井 2口注水井 1口注气井	含水率,气油比(12年) 4D地震	渗透率(29580) 孔隙度(29580)
Haugen 等 <sup>[40]</sup>	45000 (26层)	4口生产井 2口注气井	井底压力,产油速度, 含水率,气油比(5年)	渗透率(45000) 孔隙度(45000)
Bianco 等 <sup>[73]</sup>	25669 (10层)	2口生产井	井底压力,产油速度 含水率,气油比(3年)	渗透率(25669) 孔隙度(25669)
Arroyo 等 <sup>[71]</sup>	30740 (10层)	9口生产井	含水率(11年)	渗透率(30740)
Zhang 等 <sup>[70]</sup>	95379 (5层)	6口生产井 2口注水井	含水率,气油比, 地层压力,井底压力(5年)	渗透率(95379) 孔隙度(95379)
Evensen 等 <sup>[74]</sup> Seiler 等 <sup>[75]</sup>	60000 (40层)	4口生产井 1口注水井	产油速度,含水率, 气油比(6年)	渗透率(60000) 孔隙度(60000) 油水界面(5), 气油界面(5) 断层传导率(42) 垂直传导率(24) 相对渗透率(9)
Cominelli 等 <sup>[76]</sup>	416240 (44层)	3口生产井 1口注水井	产油速度,产水速度(3年) 静压力	渗透率(416240) 孔隙度(416240) 水平渗透率(44550) 垂直渗透率(44550)
Chen 等 <sup>[77]</sup>	44550 (9层)	54口生产井 和30口注水 井完井段	产油速度,产水速度, 井底压力(20年) 4D地震	孔隙度(44550) 净毛比(29700) 相对渗透率(3) 油水界面(1)

里进行了测试,具有解决大型复杂油藏自动历史拟合的潜力。Foroud 等<sup>[68]</sup>针对单一的人工神经网络方法的不足,将ANN与遗传算法结合起来,通过ANN建立和训练出一个前馈模型,用此模型作为油藏模拟器的替代模型,再基于遗传算法对油藏参数进行优化从而达到自动历史拟合的目的。另外,越来越多的混合算法应用于油藏自动历史拟合,如同步扰动随机近似(SPSA)梯度逼近法<sup>[36]</sup>、核主量分析法(KPCA)<sup>[79]</sup>、耦合禁忌搜索的遗传算法<sup>[80]</sup>等。

混合算法主要由全局优化方法和局部优化方法耦合形成,相互取长补短,提高计算效率和计算精度,是目前应用较多的油藏自动历史拟合方法。除此之外,各优化方法常与辅助自动历史拟合方法结合,提高各方法的实用性。

#### 4 辅助自动历史拟合方法

为实现油藏的自动历史拟合,研究者除在优化算法上不断改进和创新外,还提出了再参数化油藏模型,以提高计算效率。再参数化就是按照特定方式对油藏模型重新参数化

以减少模型参数的数量,主要包括粗化分区、GZA (Gradzone Analysis)、主成分分析和离散余弦变换(DCT)4种技术<sup>[52]</sup>。

粗化分区(图3)是较早出现的减少模型参数的基本方法,其目的是将不确定性参数放到某些分区里,然后对分区里的不确定性参数进行调整。Gavalas 等<sup>[15]</sup>和Shah 等<sup>[81]</sup>研究发现,采用粗化分区方法,可以增加优化算法的准确度和收敛速度。粗化分区在计算初期能迅速降低历史拟合的误差,但是最终的误差程度往往比预想的要大<sup>[5]</sup>,因为粗化分区后,

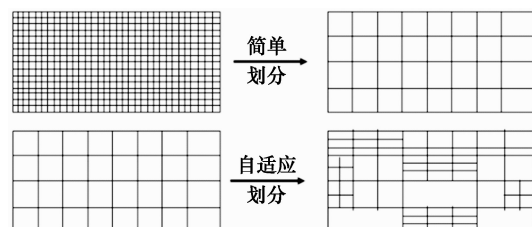


图3 简单和自适应划分

Fig. 3 Simple and adaptive zonation

模型的自由度变小,非最优的分区边界导致连续的油藏属性出现非连续的边界。

GZA 方法可以选中油藏模型中的多个分区作为一个 Gradzone, Gradzone 里,油藏属性(如渗透率)可以用一个共同的乘子进行同步更新。因此,不同分区里的模型参数可以组合起来,减小优化时的计算量,加快计算速度。Brun 等<sup>[82]</sup>扩展了 GZA 方法,通过考虑非对角先验协方差矩阵,根据特征值(相当于先验协方差的极大特征值)对油藏模型进行再参数化以减少参数数量,避免依赖先验信息权重。GZA 方法将敏感性相同的一组参数定义为一个分区,参数的减少依赖于临界值的数量,每个临界值定义了 2 个不同的参数分区<sup>[83]</sup>。

主成分分析通过因素间的协方差分析来降低数据的维度,将原来众多具有一定相关性的多个变量,重新组合成一组新的互相无关的综合变量来代替原来的变量,即用少数几个主成分来揭示多个变量间的内部结构<sup>[52]</sup>。

离散余弦变换(DCT)由 Ahmed 等于 1997 年为了信号去相关首次引入石油行业。随后, Jafarpour 等<sup>[84]</sup>和 Bhark 等<sup>[85]</sup>将 DCT 用于优化问题和历史拟合中,去掉对生产数据高度不敏

感的油藏参数,减少模型参数的数量,如图 4 所示。

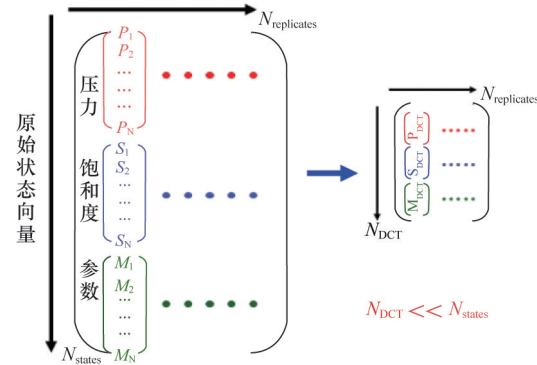


图 4 DCT 变换示意

Fig. 4 Sketch map of DCT transformation

## 5 自动历史拟合发展方向

在过去的 20 年里,历史拟合取得了长足进展。但各方法往往依赖于历史拟合问题的参数和参与拟合的数据,各有优缺点(表 3)<sup>[5]</sup>。

表 3 历史拟合方法对比

Table 3 Comparison of history matching methods

方法	优点	不足
人工	参数、数据修改的灵活性高	不确定性评价差,人力需求大,不适合变量多,不能得到详细的拟合
梯度	直观简单、收敛性好,一次迭代计算量小,程序编制简单	易陷入局部收敛,对大型油藏模型的计算速度慢,不确定性评价差
进化	适用于离散参数、高度非高斯分布,易于适应不同的模拟器	收敛速度慢,不适用于大量的变量,不确定性评价差
ANN	易于并行,稳定性强,非线性动态处理能力强,适用于大规模的油藏系统	收敛速度慢,隐层及隐层节点数的确定不固定
EnKF	高度并行,适用于变量数目多的模型,不确定性分析是同化的副产物,易于适应不同的模拟器和变量	一般会低估不确定性,对离散变量需额外参数化,不能很好地适应多峰分布数据(除非可以转换)

优化算法的计算速度与地质模型调整的合理性(可理解为计算精度),是目前自动历史拟合优化算法面临的主要难题。对于概念模型或小型简单的实际油藏,采用比较成熟的梯度类算法,即可快速完成自动历史拟合过程;对于大型复杂的实际油藏,需要采用对数据具有更优数据同化能力的 EnKF 方法或 ANN 方法。针对大型复杂的油藏模型,为了增加模型的计算速度,可以采用多核并行计算,或与其他优化方法、辅助自动历史拟合方法相结合,采用混合算法。从目前的研究和发展来看,EnKF 方法基于其本身的优势和算法程序的易实现性,会成为继梯度类方法后,下一阶段另外一种自动历史拟合主流算法;另外,进化算法和 ANN 算法会与其他局部优化算法结合,形成混合算法,也具有较大的发展潜力。

## 6 结论

经过多年的发展,油藏自动历史拟合已从简单合成模型的实验研究进入大规模实际油藏实用研究阶段,发展迅速,但是,到目前为止,还没有一种适用于所有油藏模型的自动历史拟合方法,计算速度和计算精度的兼顾仍然是自动历史拟合面临的巨大挑战。

通过对油藏自动历史拟合技术的全面调研,发现 EnKF 将成为继梯度类方法后下一阶段主要的自动历史拟合算法,另外,由进化算法和 ANN 算法结合局部优化算法形成的混合算法,也会成为未来具有发展潜力的油藏自动历史拟合方法。

油藏自动历史拟合领域的研究在国外非常活跃,各大国际油公司和科研院所都有所涉猎,其中部分已经取得可喜的

成果。但在中国,这方面的研究和投入相对较少,主要集中在理论研究和简单、理想模型的试验研究方面,与国际先进水平存在一定的差距。我们应该在理论研究的基础上,注重实用方法的研究,特别是实际应用研究,开发一套具有自动历史拟合能力的软件,提升中国在油藏自动历史拟合领域的国际竞争力。

### 参考文献(References)

- [1] Saleri N G, Toronyi R M. Engineering control in reservoir simulation: part II[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, TX: Society of Petroleum Engineers, 1988: 1-42.
- [2] Mattax C C, Dalton R L. Reservoir simulation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(6): 692-695.
- [3] Jacquard P, Jain C. Permeability distribution from field pressure data [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1965, 5(4): 281-294.
- [4] 姜忠炳, 翟瑞彩, 杨凤翔, 等. 油藏动态自动历史拟合的发展与现状 [J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(5): 345-353.  
Jiang Zhongbing, Zhai Ruicai, Yang Fengxiang, et al. The development and present condition of reservoir automatic history match[J]. China Off-shore Oil and Gas(Geology), 1997, 11(5): 345-353.
- [5] Oliver D S, Chen Y. Recent progress on reservoir history matching: A review[J]. Computational Geosciences, 2011, 15(1): 185-221.
- [6] Jahns H O. A rapid method for obtaining a two-dimensional reservoir description from well pressure response data[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1966, 6(4): 315-327.
- [7] Coats K H, Dempsey J R, Henderson J H. A new technique for determining reservoir description from field performance data[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1970, 10(1): 66-74.
- [8] Slater G E, Durrer E J. Adjustment of reservoir simulation models to match field performance[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1971, 11(3): 295-305.
- [9] Thomas L K, Hellums L J, Reheis G M. A nonlinear automatic history matching technique for reservoir simulation models[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972, 12(6): 508-514.
- [10] Dougherty E L. Application of optimization methods to oilfield problems: Proved, probable, possible[C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1972: 1-20.
- [11] Veatch Jr R W, Thomas G W. A direct approach for history matching [C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 1971: 1-12.
- [12] Chen W H, Gavalas G R, Seinfeld J H, et al. A new algorithm for automatic history matching[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974, 14(6): 593-608.
- [13] Wasserman M L, Emanuel A S, Seinfeld J H. Practical applications of optimal-control theory to history-matching multiphase simulator models[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1975, 15(4): 347-355.
- [14] Chavent G, Dupuy M, Lemmonier P. History matching by use of optimal theory[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1975, 15(1): 74-86.
- [15] Gavalas G R, Shah P C, Seinfeld J H. Reservoir history matching by bayesian estimation[J]. Old SPE Journal, 1976, 16(6): 337-350.
- [16] van den Bosch B, Seinfeld J H. History matching in two-phase petroleum reservoirs: Incompressible flow[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1977, 17(6): 398-406.
- [17] Watson A T, Seinfeld J H, Gavalas G R, et al. History matching in two-phase petroleum reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(6): 521-532.
- [18] Tang Y N, Chen Y M. Application of GPST algorithm to history matching of single-phase simulator models[J]. SPE 13410, 1985: 1-40.
- [19] Agarwal R, Li Y K, Nghiem L. A regression technique with dynamic-parameter selection or phase behavior matching[C]//SPE California Regional Meeting. Ventura, California: Society of Petroleum Engineers, 1987: 207-214.
- [20] MacMillan D J. Automatic history matching of laboratory corefloods to obtain relative-permeability curves[J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(1): 85-91.
- [21] Yang P H, Watson A T. Automatic history matching with variable-metric methods[J]. SPE Reservoir Engineering, 1988, 3(3): 995-1001.
- [22] Tan T B, Kalogerakis N. A three-dimensional three-phase automatic history matching model: Reliability of parameter estimates[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1992, 31(3): 34-41.
- [23] Tan T B, Kalogerakis N. A fully implicit, three-dimensional, three-phase simulator with automatic history-matching capability[C]//SPE Symposium on Reservoir Simulation. Anaheim, California: Society of Petroleum Engineers, 1991: 35-46.
- [24] Ouenes A, Brefort B, Meunier G, et al. A new algorithm for automatic history matching: application of simulated annealing method (SAM) to reservoir inverse modeling[J]. SPE 26297, 1993: 1-31.
- [25] Ouenes A, Saad N. A new fast parallel simulated annealing algorithm for reservoir characterization [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1993: 19-29.
- [26] Sen M K, Datta-Gupta A, Stoffa P L, et al. Stochastic reservoir modeling using simulated annealing and genetic algorithm[J]. SPE Formation Evaluation, 1995, 10(1): 49-56.
- [27] 高惠民. 运用自动历史拟合技术反求地层参数[J]. 油气井测试, 1994, 3(4): 18-24.  
Gao Huimin. Inversion solution of formation parameters by using automatic history matching technology[J]. Well Testing, 1994, 3(4): 18-24.
- [28] 王曙光, 郭德志. Nelder-Mead单纯形法的推广及其在自动历史拟合中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1998, 17(4): 25-27.  
Wang Shuguang, Guo Dezhi. Popularization of Nelder-Mead simplex algorithm and its application in automatic history matching[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1998, 17(4): 25-27.
- [29] Schiozer D J, Leitão H C. A new automated history matching algorithm improved by parallel computing[C]//Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Caracas, Venezuela: Society of Petroleum Engineers, 1999: 1-11.
- [30] Gomez S, Gosselin O, Barker J W. Gradient-based history-matching with a global optimization method[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999: 1-13.
- [31] Schulze-Riegert R W, Axmann J K, Haase O, et al. Evolutionary algorithms applied to history matching of complex reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2002, 5(2): 163-173.
- [32] Naevdal G, Mannseth T, Vefring E H. Near-well reservoir monitoring through ensemble Kalman filter[C]//SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma: Society of Petroleum Engineers, 2002: 1-9.
- [33] Liu N, Oliver D S. Ensemble Kalman filter for automatic history match-

- ing of geologic facies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 47(3): 147-161.
- [34] Liu N, Oliver D S. Critical evaluation of the ensemble Kalman filter on history matching of geologic facies[C]//SPE reservoir simulation symposium. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2005: 1-12.
- [35] Zhang F, Skjervheim J A, Reynolds A C, et al. Automatic history matching in a Bayesian framework, example applications[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: Society of Petroleum Engineers, 2003: 1-14.
- [36] Gao G, Li G, Reynolds A C. A stochastic optimization algorithm for automatic history matching[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2004: 1-23.
- [37] Williams G J J, Mansfield M, MacDonald D G, et al. Top-down reservoir modelling[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2004: 1-8.
- [38] Sahni I, Horne R N. Generating multiple history-matched reservoir model realizations using wavelets[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2004: 1-11.
- [39] Cullick A S, Johnson W D, Shi G. Improved and more rapid history matching with a nonlinear proxy and global optimization[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006: 1-13.
- [40] Haugen V E J, Natvik L J, Evensen G, et al. History matching using the ensemble Kalman filter on a North Sea field case[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006: 1-9.
- [41] Zafari M, Reynolds A C. Assessing the uncertainty in reservoir description and performance predictions with the ensemble Kalman filter [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2005: 1-18.
- [42] Kazemi A, Stephen K D. Optimal parameter updating in assisted history matching of the Nelson field using streamlines as a guide[C]//SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Barcelona, Spain: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-15.
- [43] 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.
- [44] Hajizadeh Y. Ants can do history matching[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Florence, Italy: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-15.
- [45] Zeng L, Chang H, Zhang D. A probabilistic collocation-based Kalman filter for history matching[J]. *SPE Journal*, 2011, 16(2): 294-306.
- [46] Yin J, Park H Y, Datta-Gupta A, et al. A hierarchical streamline-assisted history matching approach with global and local parameter updates[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 80(1): 116-130.
- [47] Nasralla R A, Daoud A M, Fattah K A, et al. Fast and efficient sensitivity calculation using adjoint method for three-phase field-scale history matching[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 77(3): 338-350.
- [48] Zhang X, Hou J, Wang D, et al. An automatic history matching method of reservoir numerical simulation based on improved genetic algorithm[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 3924-3928.
- [49] Xavier C R, Santos E P D, Vieira V D F, et al. Genetic algorithm for the history matching problem[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 18: 946-955.
- [50] Kaydani H, Mohebbi A, Eftekhari M. Permeability estimation in heterogeneous oil reservoirs by multi-gene genetic programming algorithm [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 123: 201-206.
- [51] Costa L A N, Maschio C, José Schiozer D. Application of artificial neural networks in a history matching process[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 123: 30-45.
- [52] Rwechungura R W, Dadashpour M, Kleppe J. Advanced history matching techniques reviewed[C]//SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 2011: 1-19.
- [53] Bertolini A C, Schiozer D J. Influence of the objective function in the history matching process[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(1): 32-41.
- [54] Anterior F, Eymard R, Karcher B. Use of parameter gradients for reservoir history matching[C]//SPE Symposium on Reservoir Simulation. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1989: 339-354.
- [55] Bissell R C, Sharma Y, Killough J E. History matching using the method of gradients: Two case studies[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 1994: 275-290.
- [56] Li R, Reynolds A C, Oliver D S. History matching of three-phase flow production data[J]. *SPE Journal*, 2003, 42(4): 70-77.
- [57] 闫霞, 张凯, 姚军, 等. 油藏自动历史拟合方法研究现状与展望[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(4): 69-73.  
Yan Xia, Zhang Kai, Yao Jun, et al. Review on automatic history matching methods for reservoir simulation[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(4): 69-73.
- [58] Chu L, Komara M, Schatzinger R A. An efficient technique for inversion of reservoir properties using iteration method[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: Society of Petroleum Engineers, 1996: 193-208.
- [59] 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.
- [60] Rodrigues J, Waechter A, Conn A, et al. Combining adjoint calculations and Quasi-Newton methods for automatic history matching[C]//SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition. Vienna, Austria: Society of Petroleum Engineers, 2006: 1-12.
- [61] Fletcher R. *Practical methods of optimization*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1987.
- [62] Zhang F, Reynolds A C. Optimization algorithms for automatic history matching of production data[C]//ECMOR VIII-8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. Freiberg, Germany: EAGE, 2002: 1-10.
- [63] Romero C E, Carter J N. Using genetic algorithms for reservoir characterisation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2001, 31(2): 113-123.
- [64] Romero C E, Carter J N, Gringarten A C, et al. A modified genetic al-

- gorithm for reservoir characterisation[C]//International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China: Society of Petroleum Engineers, 2000: 1-8.
- [65] Perez R, Larez C J, Paredes J E. Evolution strategy algorithm through assisted history matching and well placement optimization to enhance ultimate recovery factor of naturally fractured reservoirs[C]//SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition. Abu Dhabi, UAE: Society of Petroleum Engineers, 2013: 1-14.
- [66] Schulze-Riegert R W, Haase O, Nekrassov A. Combined global and local optimization techniques applied to history matching[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2003: 1-10.
- [67] Maschio C, Schiozer D J. Bayesian history matching using artificial neural network and Markov Chain Monte Carlo[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 123: 62-71.
- [68] Foroud T, Seifi A, AminShahidi B. Assisted history matching using artificial neural network based global optimization method - Applications to Brugge field and a fractured Iranian reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 123: 46-61.
- [69] Aanonsen S I, Nvdal G, Oliver D S, et al. The ensemble Kalman filter in reservoir engineering-A Review[J]. SPE Journal, 2009, 14(3): 393-412.
- [70] Zhang Y, Oliver D S. History matching using the ensemble Kalman Filter with multiscale parameterization: A field case study[J]. SPE Journal, 2011, 16(2): 307-317.
- [71] Arroyo E, Devegowda D, Datta-Gupta A, et al. Streamline assisted ensemble Kalman Filter for rapid and continuous reservoir model updating[C]//International Oil & Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China: Society of Petroleum Engineers, 2006: 1-18.
- [72] Skjervheim J A, Evensen G, Aanonsen S I, et al. Incorporating 4D seismic data in reservoir simulation models using ensemble Kalman filter[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2005: 1-10.
- [73] Bianco A, Cominelli A, Dovera L, et al. History matching and production forecast uncertainty by means of the ensemble Kalman filter: A real field application[C]//EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition. London, United Kingdom: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [74] Evensen G, Hove J, Meisingset H, et al. Using the EnKF for assisted history matching of a North Sea reservoir model[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Woodlands, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2007: 1-13.
- [75] Seiler A, Evensen G, Skjervheim J A, et al. Advanced reservoir management workflow using an EnKF based assisted history matching method[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Woodlands, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009: 1-18.
- [76] Cominelli A, Dovera L, Vimercati S, et al. Benchmark study of ensemble Kalman filter methodology: history matching and uncertainty quantification for a deep-water oil reservoir[C]//International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar: International Petroleum Technology Conference, 2009: 1-16.
- [77] Chen Y, Ollver D S. Ensemble-based closed-loop optimization applied to brugge field[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2010, 13(1): 56-71.
- [78] Gomez S, Gosselin O, Barker J W. Gradient-based history matching with a global optimization method[J]. SPE Journal, 2001, 6(2): 200-208.
- [79] Sarma P, Durlofsky L J, Aziz K, et al. A new approach to automatic history matching using kernel PCA[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2007: 1-19.
- [80] Vázquez M, Suárez A, Aponte H, et al. Global optimization of oil production systems, a unified operational view[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 2001: 1-9.
- [81] Shah S, Gavalas G R, Seinfeld J H. Error analysis in history matching: The optimum level of parameterization[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(3): 219-228.
- [82] Brun B, Gosselin O, Barker J W. Use of prior information in gradient-based history matching[J]. SPE Journal, 2004, 9(1): 67-78.
- [83] Datashpour M, Echeveria C D, Mukerji T, et al. A derivative-free approach for the estimation of porosity and permeability using time-lapse seismic and production data[J]. Journal of Geo Physics Engineering, 2010, 7(4): 351.
- [84] Jafarpour B, McLaughlin D B. History matching with an ensemble Kalman filter and discrete cosine parameterization[J]. Computational Geosciences, 2008, 12(2): 227-244.
- [85] Bhark E W, Jafarpour B, Datta-Gupta A. A new adaptively scaled production data integration approach using the discrete cosine parameterization[C]//SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-16.

## Research progress in reservoir automatic history matching

WANG Mingchuan, DUAN Taizhong, SUN Hongjun, ZHANG Junfa

Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

**Abstract** Automatic history matching (AHM) of reservoir has made great progress in both theory and application since its proposal more than 50 years ago. In order to summarize the research progress and key technologies, this paper takes the development history of AHM for the mainline and the technical progress of AHM as the core, and divides AHM into four stages: germination, formation, development and rapid development. It then systematically discusses the general optimization methods and the potential optimization methods. A comparison for these optimization algorithms is given in terms of characteristics and applicable scopes. and problems existing in current research are also presented. Finally, future direction of AHM is put forward.

**Keywords** automatic history matching; objective function; optimization algorithm; auxiliary history matching method

(责任编辑 王媛媛)