

基于改进单纯形梯度算法的油藏生产优化

闫霞¹,李阳^{1,2},姚军¹,张凯¹,闵令元³

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 2.中国石化油田勘探开发事业部,北京100029; 3.中国石化胜利油田分公司地质科学研究院,山东东营257015)

摘要:针对单纯形梯度算法计算速度慢及在油藏生产优化过程所得井的控制变量(井控参数)变化具有较强的波动性等问题,提出了一种改进的单纯形梯度算法。通过选取适当的扰动变量,使改进的单纯形梯度近似为井控参数协方差阵与真实梯度的乘积,从而考虑了井控参数变化与控制时间步之间的相关性,更利于现场操作;另外,在求解梯度时采取预处理措施,避免了利用奇异值分解及大型矩阵的求逆运算。利用改进的单纯形梯度算法对油藏生产中油井和水井的生产工作制度进行自动调整,优化过程中计算效率得到提高,得到井控参数的变化更为平缓,在实际生产中更易操作,且在第200次迭代时改进的单纯形梯度算法比原算法优化得到的净现值高 4.9×10^7 元,增幅达10%,实例结果验证了改进后算法的有效性和可行性。

关键词:油藏生产优化 改进的单纯形梯度算法 收敛速度 控制变量 经济效益

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)03-0065-03

单纯形梯度算法(Simplex Gradient Method)是1998年由Bortz和Kelley提出的一种多维参数优化算法^[1-4],将单纯形梯度信息作为优化算法的搜索方向。为获得单纯形梯度,需生成一系列不同的控制变量向量来预测一组目标函数值,基于单纯形梯度算法的运算效率取决于用于单纯形梯度计算的控制变量向量的个数。目前中国对该方法的研究甚少,笔者对单纯形梯度算法进行了改进,并将其应用于油藏生产优化中。油藏生产优化^[5]是指在油藏开发过程中通过最大化经济效益(经济净现值),确定最优生产工作制度的过程,即优化各时间控制步中生产井和注水井的井控参数(井底流压或产量等),是实现油藏实时动态管理及智能油田管理^[6-9]的重要环节。一般情况下,通常采用伴随法求解梯度信息,但对于伴随代码的编写需要与商业油藏模拟器内部代码结合,且其求解过于复杂,伴随法求解梯度仅适用于商业油藏数值模拟软件可模拟的部分油藏。在实际油藏生产优化过程中,经济净现值与井控参数向量成非线性关系,因此单纯形梯度是真实梯度的近似,可为真实梯度难以求解的优化问题提供一种有效方法。

1 优化方法基本原理

1.1 单纯形梯度算法

油藏生产优化属于多变量优化问题,需要最大化性能目标函数。在迭代步中,控制变量向量的迭代公式^[10]为

$$\mathbf{x}^{l+1} = \mathbf{x}^l + \alpha^l \mathbf{d}^l \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为需要优化的控制变量向量; l 为迭代次数; α^l 为第 l 迭代步的搜索步长,通常可以通过线搜索方法进行调整; \mathbf{d}^l 为第 l 迭代步的搜索方向,即梯度向量。

要计算单纯形梯度,首先利用扰动向量生成一组不同的参数向量以计算目标函数值,即构造一个单纯形。在 \mathbf{x}^l 处进行扰动生成 N_e 个控制变量向量,即

$$\hat{\mathbf{x}}_j^l = \mathbf{x}^l + \delta \mathbf{x}_j^l \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_j^l$ 为第 j 个加入扰动的控制变量向量; j 为控制变量向量数,其值为 $1, 2, \dots, N_e$; $\delta \mathbf{x}_j^l$ 为第 j 个扰动向量。

收稿日期:2013-03-12。

作者简介:闫霞,女,在读博士研究生,从事智能油田、油藏自动历史拟合及生产实时优化研究。联系电话:13864892450, E-mail: yanxia_upc@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“海上大井距多层采稠油油藏开发调整方案优化设计方法研究”(2008ZX05024-002-008),国家自然科学基金项目“油藏生产动态实时优化方法研究”(61004095),长江学者和创新团队发展计划资助“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(IRT1294),中央高校基本科研业务费专项资金“自适应井网优化理论与方法研究”(13CX02053A)。

令 $\delta f_j^l = f(\hat{x}_j^l) - f(x^l)$, 利用一阶泰勒级数展开, 并整理可得

$$f(\hat{x}_j^l) - f(x^l) = \nabla f(x^l) \delta x_j^l \quad (3)$$

式中: f 为目标函数; ∇f 为目标函数的梯度。

令 $\Delta F^l = (\delta f_1^l, \delta f_2^l, \delta f_3^l, \dots, \delta f_{N_e}^l)$, $\Delta X^l = (\delta x_1^l, \delta x_2^l, \delta x_3^l, \dots, \delta x_{N_e}^l)$, 并结合式(3), 可得

$$(\Delta F^l)^T = (\Delta X^l)^T \nabla f(x^l) \quad (4)$$

式中: ΔF^l 为 N_e 维的目标函数值增量的行向量; ΔX^l 为 $N_x \times N_e$ 维的扰动矩阵。

对式(4)进行求解, 可得单纯形梯度的表达式为

$$d^l = \nabla f(x^l) = (\Delta X^l)^{-T} (\Delta F^l)^T \quad (5)$$

在实际油藏生产过程中, 井控参数向量的个数要远远小于井控参数向量(或梯度向量)的维数, 即 $N_x \gg N_e$, 因此, 式(4)的解不惟一。计算单纯形梯度关键问题是求大型矩阵 ΔX^l 的伪拟, 求解较为困难, 一般利用奇异值分解法^[11]计算矩阵的伪拟 $(\Delta X^l)^{-1}$ 。

1.2 改进的单纯形梯度算法

改进的单纯形梯度算法, 可通过选取适当的扰动向量使控制变量满足正态分布—— $N(x^l, C_X)$, C_X 为 $N_x \times N_x$ 维的控制变量的协方差矩阵^[11]。利用单纯形梯度算法对控制变量进行扰动时, 式(2)中取 $\delta x_j^l = L z_j^l$, 其中, L 是通过将 C_X 进行 Cholesky 分解得到下三角矩阵, 即 $C_X = LL^T$ 。在 x^l 处进行 N_e 次扰动生成满足正态分布的参数向量, 即

$$\hat{x}_j^l = x^l + L z_j^l \quad (6)$$

式中: z_j^l 为第 j 个含有 N_x 个相互独立随机扰动变量的列向量。

z_j^l 中的元素为满足标准正态分布 $N(0, 1)$ 的随机变量, 因此期望值 $E[z_j^l] = 0$, $E[z_j^l (z_j^l)^T] = \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为 $N_x \times N_x$ 维的单位矩阵。

在求解原单纯形梯度的方程(式(4))时, 采用预处理手段, 选取预处理因子 $\left(\frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l\right)$ 对方程两边同时进行左乘运算得

$$\frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l (\Delta F^l)^T = \frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l (\Delta X^l)^T \nabla f(x^l) \quad (7)$$

由于通过对扰动向量的改造使其元素满足正态分布—— $N(x^l, C_X)$, 因此有 $\frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l (\Delta X^l)^T \approx C_X$, 则式(7)变为

$$\frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l (\Delta F^l)^T \approx C_X \nabla f(x^l) \quad (8)$$

将 $C_X \nabla f(x^l)$ 近似值作为搜索方向, 改进的单纯形梯度(预处理单纯形梯度)为

$$d_m^l = C_X \nabla f(x^l) = \frac{1}{N_e - 1} \Delta X^l (\Delta F^l)^T \quad (9)$$

式中: d_m^l 为改进的单纯形梯度。

由式(8)可以看出, 预处理单纯形梯度近似为控制变量协方差矩阵与真实梯度的乘积, 是真实梯度的近似, 改进的单纯形梯度信息考虑了控制变量的协方差矩阵。根据式(9)可知, 改进的单纯形梯度算法在求解前只需生成1组满足 $N(x^l, C_X)$ 分布的控制变量向量, 即可通过式(9)对 ΔX 与 ΔF 进行简单的向量乘积运算获得梯度信息, 避免了对大型矩阵的求解及对矩阵进行奇异值分解的计算。在获得相关梯度信息后, 可以通过简单的线搜索方法^[12-13], 利用式(1)对控制变量进行迭代更新。

2 油藏生产优化应用

2.1 油藏生产优化性能指标函数

在油藏生产优化中, 通常采用最优控制数学模型评价油藏开发效果, 其表达式为

$$f(y, s) = \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{m=1}^{N_p} [c_o q_{om}^n(y, s) - c_w q_{wm}^n(y, s)] - \sum_{i=1}^{N_i} c_{wi} q_{wi}^n(y, s) \right\} \times \frac{\Delta t^n}{(1+b)^n} \quad (10)$$

式中: $f(y, s)$ 为性能指标函数, 即油藏开发获得的经济净现值, 元; y 为优化的井控参数向量, 在油藏生产优化中, 具体指的是油井和水井各时间控制步中的注采参数(注水量、井底流压等); s 为油藏状态变量向量; N 为时间控制步的总个数, 个; N_p 为生产井总数, 口; c_o 为原油价格, 元/m³; q_{om}^n 为第 m 口生产井在 n 时刻的平均产油速度, m³/d; c_w 为产水成本, 元/m³; q_{wm}^n 为第 m 口生产井在 n 时刻的平均产水速度, m³/d; N_i 为注水井总数, 口; c_{wi} 为注水成本, 元/m³; q_{wi}^n 为第 i 口注水井在 n 时刻的平均注水量, m³/d; Δt^n 为 n 时刻数值模拟时间步, d; b 为平均年利率, %; t^n 为 n 时刻累积计算时间, d。

油藏状态变量表征流体状态的分布, 由于其变化也受控制变量影响, 因此可以将性能指标函数看作关于控制变量的函数。油藏生产优化是通过算法自动调整各时间步中井的控制变量, 利用油藏数

值模拟计算得到油藏状态变量,进而获得在当前时间步的产油量、产水量及注水速度,计算得到性能指标函数的最大值。

2.2 实例分析

基于改进的单纯形梯度算法,对某油藏进行生产优化计算。该油藏共15口井,包括6口生产井和9口注水井。油藏初始含油饱和度为0.25。生产过程中每180 d进行1次调控,总优化时间为1 800 d,因此有10个时间控制步,150个控制变量。在优化过程中,考虑边界约束条件,对生产井采用井底流压控制,其上、下界压力分别为42和10 MPa;对注水井采用流量控制,其上、下界流量分别为250和0 m³/d。原油价格为2 500元/m³,处理产出水成本为200元/m³,注入水成本为0,年利率为10%。在改进的单纯形梯度算法实现中,初始迭代步长为5;在每个迭代步取10个随机控制变量向量用以计算对应的目标函数值及近似梯度。

程序基于Fortran语言实现,利用油藏模拟器Eclipse进行数值模拟计算。由注水井INJ-7井优化后注水量变化(图1)可知:单纯形梯度算法优化后

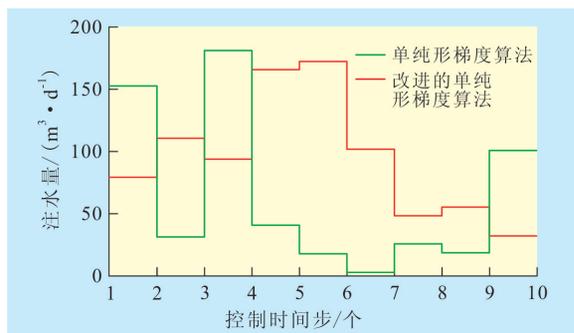


图1 注水井INJ-7井的注水量生产调控

注水量随时间控制步增加变化剧烈,尤其是第1至第5个控制时间步,优化得到的结果不便于油田实际操作控制;而利用改进的单纯形梯度算法计算得到的注水量变化明显平缓。由2种算法优化得到的生产井PRO-3井的井底流压(图2)可知,通过单纯形梯度算法得到的井底流压变化剧烈,而利用改进

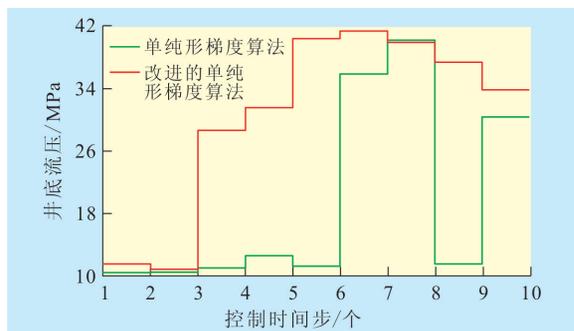


图2 生产井PRO-3井的井底流压生产调控

的算法优化得到的井底流压变化相对光滑连续,考虑了井底流压随时间控制步的相关性,更有利于现场操作。

针对目标函数随迭代次数的变化情况,将单纯形梯度算法与改进的单纯形梯度算法进行对比,结果(图3)表明:与单纯形梯度算法相比,在同样的迭代次数条件下,改进的单纯形梯度算法收敛速度非常快。在第200次迭代时,改进后的单纯形算法优化得到的经济净现值达到 5.42×10^8 元,相比原算法优化得到的经济净现值(4.93×10^8 元)多 4.9×10^7 元,目标函数值较原算法增幅约为10%。由此可见,改进的单纯形梯度算法优化得到井控参数的变化更加平缓,其目标函数值也显著增加。

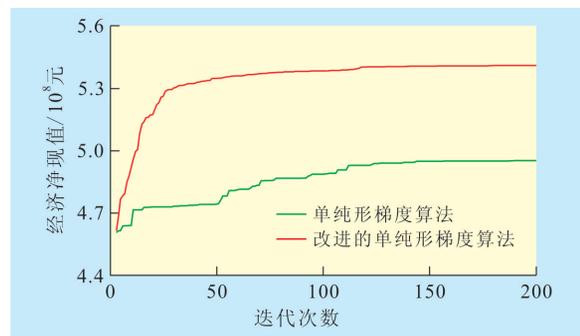


图3 性能指标函数优化效果

3 结束语

改进的单纯形梯度算法可以解决油藏生产优化过程中梯度求解困难的问题。与原算法相比,改进的单纯形梯度算法避免了对矩阵的求逆等运算,计算过程更为简单,收敛速度更快,可获得更高的目标函数值(经济净现值);同时,对井控参数变化的调控更为平缓,优化控制方案更加光滑连续,便于实际操作控制。

以油水两相油藏为例,旨在说明改进的单纯形梯度算法在油藏生产优化中的应用,基于改进的单纯形梯度算法的优势,还可将其扩展应用于三相及聚合物驱油藏,以经济净现值为性能指标函数,考虑产气和注聚合物成本等,从而实现油藏经济高效的开发。

参考文献:

- [1] Bortz D, Kelley C. "The simplex gradient and noisy optimization problems" in computational methods in optimal design and control [C]//Jeff B, John B, Eugene C, et al. Computational methods in optimal design and control. Boston: Birkhauser, 1998:77-90.

(下转第71页)