

文章编号: 0253-2697(2008)02-0296-04

# 利用遗传算法进行水平井水平段长度优化设计

柳毓松<sup>1</sup> 廉培庆<sup>1</sup> 同登科<sup>1</sup> 田冀<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学数学学院 山东东营 257061; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要:** 在油藏开发过程中,随着水平井水平段长度的增加,水平井段与油藏的接触面也随之增加,同时井筒内流体的流动阻力也增加,从而导致水平井的产液量减少,即水平井的最终产量是2个相互制约的因素共同作用的结果。利用遗传算法全局寻优的特点,结合一种计算无限导流和有限导流情况下水平井产量的井筒/油藏耦合模型,提出了一种用于水平井水平段长度的优化设计方法。该方法可以在不同的油藏地质模型中使用。

**关键词:** 水平井;水平段长度;优化设计;遗传算法;井筒/油藏耦合模型

**中图分类号:** TE243.2

**文献标识码:** A

## Optimum design of the horizontal section length in a horizontal well using genetic algorithm

LIU Yusong<sup>1</sup> LIAN Peiqing<sup>1</sup> TONG Dengke<sup>1</sup> TIAN Ji<sup>2</sup>

(1. College of Mathematics, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** As the length of a horizontal well section increases, the contact area between the horizontal well and reservoir increases. At the same time, the resistance to fluid flow in the horizontal well also increases, which has a negative effect on the fluid productivity of a well. The overall performance depends on the balance of the above two opposing factors. According to a reservoir-wellbore coupling model for calculating the fluid productivity of a horizontal well under the conditions of the infinite-conductivity and finite-conductivity, the genetic algorithm was used to find a general optimal solution. A methodology for designing the optimum length of the horizontal section in a horizontal well was developed. This method can be run under a variety of constraints.

**Key words:** horizontal well; horizontal section length; optimum design; genetic algorithm; reservoir-wellbore coupling model

水平井是开发油气田提高采收率的一项重要技术。通常水平井水平段越长,生产水平越高。但是增大水平段长度会导致钻井成本大幅度增加。同时,随着水平段的延伸,不仅使钻井周期增加,而且作业难度也越来越大,实际费用增加,风险费用也将越来越大。因此,选择合理的水平段长度是水平井开发过程中一个极其重要的问题<sup>[1-5]</sup>。笔者利用遗传算法<sup>[6]</sup>良好的寻优特点,结合井筒/油藏耦合模型<sup>[7-8]</sup>,提出了一种进行水平井水平段长度优化设计的通用方法。

## 1 遗传算法简介

### 1.1 遗传算法计算过程

首先对待解决问题的模型结构和参数进行编码,一般用串表示。计算过程为:①对解决的问题进行编码;② $t=0$ ,随机初始化群体  $X(0) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;③计算当前群体  $X(t)$ 中每个个体  $x_i$  的适应度

$F(x_i)$ ,适应度表示该个体的性能好坏;④应用选择算子,产生中间代  $X_r(t)$ ;⑤应用交叉算子和变异算子对  $X_r(t)$ 产生新一代群体  $X(t+1)$ ,这些算子可以扩展有限个体的覆盖面,体现全局搜索的原理;⑥令  $t=t+1$ ,如果不满足终止条件,则继续步骤③。

### 1.2 遗传算法中最常用参数的选取

(1) 群体规模:群体规模影响遗传优化的最终结果以及遗传算法的执行效率。群体规模太小,遗传算法的优化性能差;较大的群体规模则可减少遗传算法陷入局部最优解的机会,但计算复杂度高。通常群体规模取为10~160。

(2) 算子的选择:从群体中按某一概率成对选择个体,某个体  $x_i$  被选择的概率与其适应度值成正比。通常的实现方法是轮盘赌模型。

(3) 交叉算子:将被选中的两个个体的基因链按

**基金项目:** 国家高科技研究发展规划(863)项目(2006AA06Z236)和山东省自然科学基金项目(Y2007F13)联合资助。

**作者简介:** 柳毓松,男,1977年2月生,2002年获石油大学(华东)石油工程学院硕士学位,现为中国石油大学(华东)数学学院讲师,主要从事教学和油藏数值模拟研究。E-mail:ysliu1758@163.com

一定的概率进行交叉,生成两个新的个体,交叉位置是随机的。交叉的概率控制着交叉操作被使用的频度。一般交叉的概率取为0.25~1.0。

(4) 变异算子:将每个新个体基因链按一定的概率进行变异,主要是维持解群体的多样性。通常变异的概率取为0.001~0.2。

(5) 最大代数:最大代数影响遗传优化的计算速度,一般最大代数取为100~1500。

## 2 水平井井筒/油藏耦合模型

利用 Penmatcha 提出的非稳态条件下的水平井井筒与油藏耦合模型<sup>[8]</sup>,可以计算盒式油藏中无限导流和有限导流情况下水平井的产能。该模型可以用于非稳态和拟稳态流动,比常规的稳态产能模型更能准确地反映井筒内产能的分布,可以在不同的油藏地质模型中使用,比以前的模型更具广泛性。

在6个外边界封闭的盒式均质油藏中有一口半径为 $r_w$ 、长度为 $L$ 的水平井。油藏高为 $h$ ,长为 $a$ ,宽为 $b$ (图1),水平井与 $y$ 轴平行。油藏中的流体是单相微可压缩的。

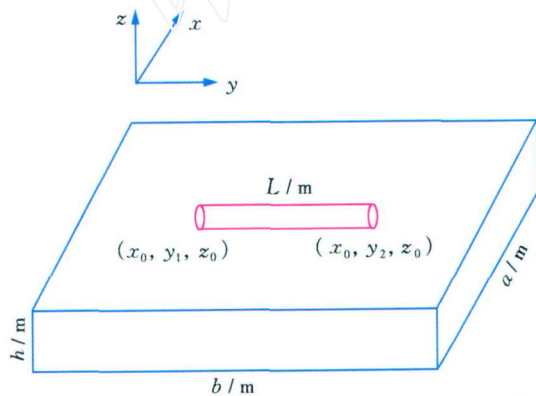


图1 盒式油藏中的水平井示意图

Fig. 1 The sketch plan of a horizontal well in a box-shaped drainage volume

### 2.1 均匀流量井模型

当水平井完全穿透油藏(完善井)时,流量沿整个水平井轴均匀分布,但压力分布不均匀。Babu 和 Odeh 给出了该情况下油藏中任意一点 $(x, y, z)$ 在任意时刻 $t$ 的压降公式为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_i - p(x, y, z, t) \\ &= \frac{B\mu q}{abhL\alpha} \int_0^t \int_{y_1}^{y_2} S_1 S_2 S_3 dy_0 d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} S_1 &= S_1(x, x_0, \tau) \\ &= 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{n\pi x_0}{a} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi k_x \tau}{\alpha a^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= S_2(y, y_0, \tau) \\ &= 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{n\pi y_0}{b} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi k_y \tau}{\alpha b^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_3 &= S_3(z, z_0, \tau) \\ &= 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi z}{h} \cos \frac{n\pi z_0}{h} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi k_z \tau}{\alpha h^2} \right] \end{aligned}$$

$$\alpha = \phi \mu c_t$$

式中: $p_i$ 为油藏初始时刻的压力,MPa; $p(x, y, z, t)$ 为 $(x, y, z)$ 处的压力,MPa; $B$ 为流体的体积系数; $\mu$ 为流体的黏度,mPa·s; $c_t$ 为总压缩系数,MPa<sup>-1</sup>; $\phi$ 为孔隙度; $k_x, k_y$ 和 $k_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向上的渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $y_1$ 为水平井根端 $y$ 方向位置,m; $y_2$ 为水平井指端 $y$ 方向位置,m; $S_1, S_2$ 和 $S_3$ 表示水平井内的中心坐标点 $(x_0, y_0, z_0)$ 处的源函数(Green函数),由于水平井与 $y$ 轴平行,故 $x_0$ 和 $z_0$ 为常数,而 $y_0$ 为变量。

为了便于推导,把式(1)写成

$$\Delta p = p_i - p = q \cdot F(t) \quad (2)$$

式中: $q$ 为产液量, $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 2.2 无限导流井模型

当水平井部分穿透油藏(不完善井)时,在油藏压力下使得水平井两端的流体流动比中间快。此时沿水平井井轴压降均匀分布(因假设整个油藏的压力 $p_i$ 是常数,故井筒的压力也为常数),但流量分布不均匀,井筒为无限导流。

将水平井筒分为 $n$ 段,第1段为最靠近水平井根端的井段,而第 $n$ 段为最靠近指端的井段。假设每一小段井筒满足式(2),对时间和空间叠加,就得到了无限传导模型。

在进行空间上的压力叠加时,考虑各段间相互作用。每个小段的压力节点位于小段中间,并且由水平井的中心开始以 $r_w$ 的长度发散。因而节点压力代表与油藏接触的井筒外表面的油藏压力。

在 $\Delta t$ 时刻第 $i$ 个井段的压降为

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^n q_j F_{ij}(\Delta t) \quad (3)$$

式中: $q_j$ 表示第 $j$ 个井段的流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $F_{ij}$ 表示第 $j$ 个井段对第 $i$ 个井段的影响。

此时, $n$ 个井段的流量未知,为得到唯一解,需要 $n$ 个方程。第1个井段的压降与第 $i$ 个井段的压降差为

$$\Delta p_1 - \Delta p_i = \sum_{j=1}^n q_j [F_{1j}(\Delta t) - F_{ij}(\Delta t)] \quad (4)$$

无限导流假设井筒的压力为常数,因此式(4)的左端等于零,可得到 $n-1$ 个方程。如果井的总流量或井

底流压给定,就可给出井的一个流量约束,从而得到第  $n$  个方程。

假设时间步长等于  $\Delta t$ ,则当  $t = n\Delta t$  时(第  $n$  个时间段的结尾),可以得到第  $i$  个井段在第  $n$  个时间步时的压降为

$$p_i - p_i(n\Delta t) = \sum_{j=1}^n \left\{ q_j(\Delta t) F_{ij}(n\Delta t) + \sum_{k=2}^n \{ q_j(k\Delta t) - q_j[(k-1)\Delta t] \} F_{ij}[(n-k+1)\Delta t] \right\} \quad (5)$$

由式(5)可得所有时间段不同井段的流量分布。

### 2.3 有限导流井模型

有限导流井筒(图2)的压力不为常数,流量分布不均匀。此时式(4)的左端不等于0,有  $4n$  个未知变量:①油藏节点压力:  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ; ②井的节点压力:  $p_{w1}, p_{w2}, \dots, p_{wn}$ ; ③从油藏节点到井节点的流量:  $q_1, q_2, \dots, q_n$ ; ④井段间的流量:  $q_{w1}, q_{w2}, \dots, q_{wn}$ 。

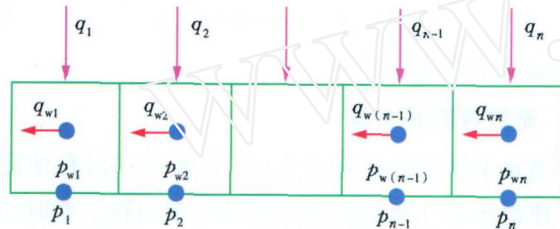


图2 有限导流井模型

Fig. 2 Finite conductivity well model

为得到唯一解,需要从质量守恒方程、压力连续性方程、流动方程、压降方程、约束方程(流量约束或井底流压约束)等方面考虑<sup>[8]</sup>。

有限导流井筒模型除了考虑摩阻压降、加速度压降,还考虑了井筒径向流的影响。

### 2.4 模型的推广

用相应油藏的水平井源函数替换原来的盒式油藏中水平井源函数,即可将模型推广到其他常见油藏中。常见水平井源函数有以下几种:

(1) 对于上顶、下底封闭的无限大油藏,其源函数为

$$S_1(x, x_0, \tau) = \left[ 2\sqrt{\pi \frac{k_x}{\alpha} \tau} \right]^{-1} \exp \left[ -\frac{\alpha(x-x_0)^2}{4k_x\tau} \right] \quad (6)$$

$$S_2(y, y_0, \tau) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{L/2 + (y-y_0)}{2\sqrt{\frac{k_y}{\alpha} \tau}} \right] + \operatorname{erf} \left[ \frac{L/2 - (y-y_0)}{2\sqrt{\frac{k_y}{\alpha} \tau}} \right] \right\} \quad (7)$$

$$S_3(z, z_0, \tau) = \frac{1}{h} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \cos\left(\frac{n\pi z_0}{h}\right) \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2 k_z \tau}{\alpha h^2} \right] \right] \quad (8)$$

(2) 对于气顶底水无限大油藏(油藏上、下边界均为定压边界),其水平井源函数  $S_1$  和  $S_2$  分别与式(6)和式(7)相同,  $S_3$  表示为

$$S_3(z, z_0, \tau) = \frac{2}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \sin\left(\frac{n\pi z_0}{h}\right) \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2 k_z \tau}{\alpha h^2} \right]$$

## 3 遗传算法在水平井水平段长度优化设计中的应用

### 3.1 编码

为简单起见,以实数编码为例,基因串  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的形式为  $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ , 其中  $n$  为解空间维数,  $N$  为群体规模。

基因串由影响油井产油量的8个参数组成,包括渗透率、孔隙度、压缩系数、体积系数、原油黏度、原油密度、井筒半径和井长。其中:前7个参数的变化范围较小,其计算值与实际值有一定误差;而井长变化较大。

### 3.2 适应函数的确定

对群体中所有个体的适应性评价常须直接利用待优化问题的目标函数。目标函数取为水平井的利润  $G_t$ , 其计算式为

$$G_t = \sum_{i=1}^t W_i Q_i \frac{1}{(1+s)^i} \quad (9)$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  天的产油量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $W_i$  为第  $i$  天的油价,  $\text{元}/\text{m}^3$ ;  $s$  为利率;  $t$  为生产时间,  $\text{d}$ 。

总费用  $G_s$  简单地表示为钻井费用与平时操作费用之和,即

$$G_s = C_f + C_h L + C_m t \quad (10)$$

式中:  $C_f$  为垂直井的费用,  $\text{元}$ ;  $C_h$  为单位长度水平井的费用,  $\text{元}/\text{m}$ ;  $C_m$  为每天的操作费用,  $\text{元}/\text{d}$ 。

净收入  $R = G_t - G_s$ , 为适用度函数,水平井长度  $L$  在编码过程中由遗传算法随机生成,而产油量  $Q_i$  则由水平井井筒与油藏耦合模型计算得到。

### 3.3 计算实例

对我国某气顶底水驱动油藏中一口水平井进行了计算,该油藏的相关数据如下:油藏水平渗透率为  $0.164 \mu\text{m}^2$ ;油藏垂直渗透率为  $0.0492 \mu\text{m}^2$ ;油藏高度为  $33.5 \text{m}$ ;油层压力为  $41.6 \text{MPa}$ ;水平井与油水界面

距离为 22 m;井产量为  $1148.4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;水平井井筒半径为 0.103 0 m;原油密度为  $840 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;原油黏度为  $0.129 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ;体积系数为 1.615;水平井井底流压力为 41.35 MPa;油价为  $1500 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

经计算,最优水平井长度为 473 m,该水平井实际水平段长度为 444.4 m。另外,由水平井长随代数的变化趋势可以看出(图 3),在遗传算法计算的初期,水平井长变化很大;在计算后期,变化速度明显变缓。当计算到 120 代时,即得出最优水平井长度。

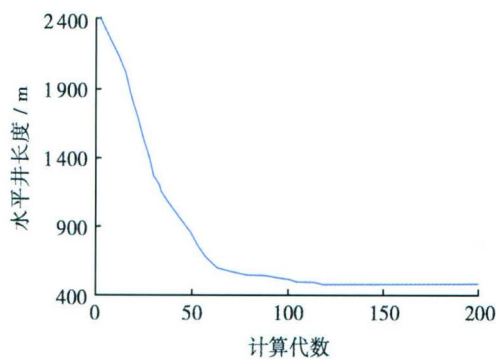


图 3 水平井长度与代数之间的关系

Fig. 3 The relation between length of horizontal wells and computation generation

## 4 结论

(1) 利用遗传算法进行水平井水平段长度的优化设计方法,不要求导和限定函数连续性,有较好的全局寻优能力。

(2) 用于水平井产能计算的模型可根据实际情况进行更换,具有较大的灵活性。采用了水平井井筒与油藏耦合模型,不仅考虑了井筒中流体的流动状态,还考虑了摩阻压降、加速度压降、井筒径向流的影响。因而该模型比常规的稳态产能模型更准确地反映井筒内产能的分布,更具广泛性。

(3) 使用中须注意遗传参数的选择,如群体规模、交叉概率、变异概率、最大代数。通过调整,可控制遗传算法在较短时间内进行较准确的计算。

## 参 考 文 献

- [1] 胡月亭,周煜辉,苏义脑,等. 水平井水平段长度优化设计方法[J]. 石油学报,2000,21(4):80-86.  
Hu Yueying, Zhou Yuhui, Su Yinao, et al. Methods of optimal horizontal section length of a horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 80-86.
- [2] 范子菲,方宏长,俞国凡. 水平井水平段最优长度设计方法研究[J]. 石油学报,1997,18(1):55-62.  
Fan Zifei, Fang Hongchang, Yu Guofan. A study on design method of optimal horizontal wellbore length [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 55-62.
- [3] Kunt S, Ivar A, Puiip R, et al. Considering wellbore friction effects in planning horizontal wells [R]. SPE 21224, 1993.
- [4] Dikken B J. Pressure drop in horizontal wells and its effect on production performance [R]. SPE 19824, 1990.
- [5] Novy R A. Pressure drops in horizontal wells: When can they be ignored [R]. SPE 24941, 1995.
- [6] 王小平,曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:18-49.  
Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithms-theory, applications and software implements [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 18-49.
- [7] 刘想平,郭呈柱,蒋志祥,等. 油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J]. 石油学报,1999,20(3):82-86.  
Liu Xiangping, Guo Chengzhu, Jiang Zhixiang, et al. The model coupling fluid flow in the reservoir with flow in the horizontal wellbore [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 82-86.
- [8] Penmatcha V R, Aiz K. A comprehensive reservoir/wellbore model for horizontal wells [R]. SPE 39521, 1998.
- [9] Babu D K, Odeh A S. Productivity of a horizontal well [R]. SPE 18298, 1989.

(收稿日期 2007-05-24 改回日期 2007-08-01 编辑 仇学艳)

## 重要通知

为了缩短出版周期,《石油学报》从 2008 年 1 月 1 日开始,全面实行网上投稿。

网上投稿方法:请登录网站 [www.syx-b-cps.com.cn](http://www.syx-b-cps.com.cn)(外网)或 [syxb.cnpc.com.cn](http://syxb.cnpc.com.cn)(内网),点击“作者投稿”,按照要求进行注册,然后根据提示即可完成投稿操作。以后您可以凭自己的用户名、密码随时在线查询稿件处理情况。衷心感谢您对《石油学报》编辑部工作的支持与配合!

《石油学报》编辑部