

海上油田井网经济评价及优化模型*

范海军 吕爱民 姚 军 杜殿发

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 东营, 257061)

摘 要 本文通过井组数值模拟方法,对海上油田开发不同井网模式的开发效果及经济效益进行了研究,指出水平井九点法井网是开发海上油田的一种较好的井网模式.提出了海上油田开发中钻井平台及井网布局整体优化模型,并讨论了遗传算法在模型求解中的应用.

关键词 海洋,油田开发,井网,经济评论

1. 引言

我国近海蕴藏着丰富的油气资源,根据勘探预测,石油资源量达到 275.3 亿吨,天然气资源量达到 10.6 万亿立方米,而目前原油的发现率仅为 9.2%,因此我国近海海域极具勘探开发潜力.更多地从海洋开发石油,已成为为中国石油发展的新战略之一.与陆上油田勘探开发相比,海洋油田的开发成本是非常昂贵的,而且是高风险的,因此决定了项目建设前对项目进行科学的经济评价论证十分必要.在海洋油田项目建设过程中,首先要根据勘探成果,研究油田规模,然后根据油田及水深特点设计不同的平台和井网模式,而海上油田井网与陆上油田井网相比更具复杂性,是包括各种直井、水平井、分支井、大位移井等多种复杂结构井组成的复杂的矢量井网,因此研究评价方法将与陆上油田有很大不同,研究海洋油田开发平台及钻井的综合经济评价,将具有十分重要的意义,我国已将海洋油田开发复杂结构井设计及优化列入了国家“十五”和“十一五”的“863”计划.

2. 海上油田开发不同井网模式的经济分析

首先选择胜利油田埕岛油田一区的两个主力层为研究对象,该油藏为河流相沉积的高渗透、高饱和、稠油、疏松砂岩油藏.横向上受构造和岩性双重控制,连通性差;纵向上含油井段长达 250 - 300m, Ng^{1+2-6} 砂层组划分为 30 个小层,但单层厚度薄,平均单井钻遇油层 32m/7.3 层,单层厚度一般 3 - 6m,平均 4.4m.储层物性好,为高孔高渗疏松砂岩储集层,岩心分析平均孔隙度 33.9%,渗透率 $2257 \times 10^{-3} \mu m^2$,碳酸盐含量 1.2%,泥质含量 7.6%,粒度中值 0.13mm,分选系数 1.56.但储层非均质较严重,平面上砂体几何形态变化大、连续性差、渗透率分布具有明显的方向性;纵向上,从油井测井二次解释后储层参数分析看, $Ng^{1+2} - Ng^5$ 砂层组的 21 个小层,渗透率突进系数 > 2.0 的小层 18 层,占 85.7%;渗透率级差 $> 100 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的小层 8 层,

* 基金项目:国家 863 基金项目(No. 2004AA616170)

收稿日期:2005 - 12 - 07

占 38.1 %.

区域面积 $2.0 \times 2.0 = 4.0 \text{ km}^2$, 设为 2 个目的层, 地质储量为 $1040.9 \times 10^4 t$. 在研究区域内分别布置三点法、五点法、七点法、九点法等井网形式共 11 种不同井网模式, 利用三维三相黑油数值模型对各种矢量井网的开采动态进行了计算. 将井网形式分别编号: 3-1、5-1、5-2、5-3、5-4、5-5、7-1、7-2、7-3、9-1、9-2, 如图 1~11 所示.

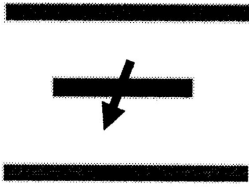


图 1 三点法井网(3-1)

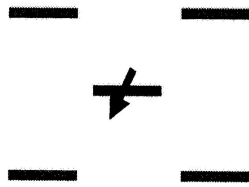


图 2 五点法井网(5-1)

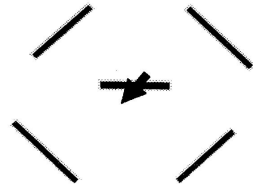


图 3 五点法井网(5-2)

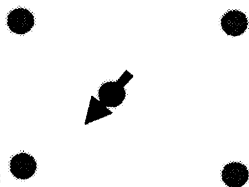


图 4 五点法井网(5-3)

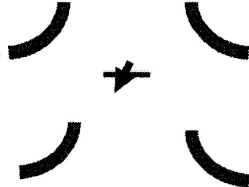


图 5 五点法井网(5-4)

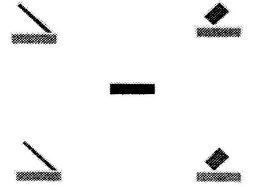


图 6 五点法井网(5-5)

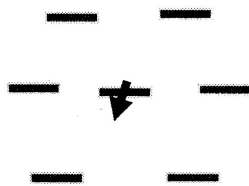


图 7 七点法井网(7-1)

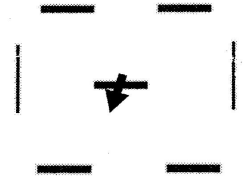


图 8 七点法井网(7-2)

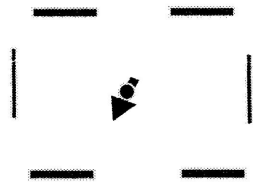


图 9 七点法井网(7-3)

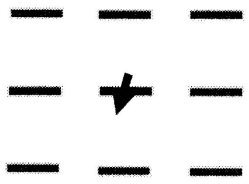


图 10 九点法井网(9-1)

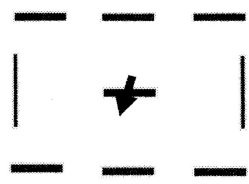


图 11 九点法井网(9-2)

海洋油田开发经济评价中收益主要来源于原油和天然气的销售收入, 费用主要有固定资产投资、操作成本费用和税金三大部分. 其中固定资产投资主要有油水井钻井成本、平台建设费用和其他费用; 操作成本费用包括生产人员工资及福利、作业费、测井试井费及修理费、油气处理费, 燃料动力费、原油运输费, 管理费, 其他费用; 税金包括增值税(海洋原油开采 5%)、城市维护建设税、教育费附加、资源税、矿产资源补偿费和企业所得税. 相关经济参数均按照石油天然气行业标准有关海上油田开采的规定取值.

根据不同井网的数值模拟结果, 计算出不同井网条件下的净现值, 对不同井网进行经济评

价,从经济上比较不同井网的开采效果.

表 1 不同井网的经济计算结果

井网方式	模型号	累产油(万吨)	净现值(万元)
三点法	3 - 1	495. 58	194552
五点法	5 - 1	497. 84	239214
	5 - 2	347. 63	140187
	5 - 3	411. 40	183641
	5 - 4	371. 79	150167
	5 - 5	508. 55	242897
七点法	7 - 1	546. 56	269745
	7 - 2	559. 71	278247
	7 - 3	351. 91	158717
九点法	9 - 1	638. 54	335481
	9 - 2	649. 45	338465

从净现值(NPV)的大小比较可以看出,采用九点法的井网的净现值最大.七点法要好于五点法和三点法.在七点法和五点法井网中,采用直井和斜井的井网(5 - 2、5 - 3、5 - 4、7 - 3)普遍没有水平井井网的收益高,所以从此可以看出海上油田的最优井网设计为水平井密井网形式.

3. 海上油田开发井网整体优化方法

以上只是考虑一个井组对海上油田不同井网形式的经济收益进行对比,在海上油田整体开发设计过程中,可能包括众多的油水井数和不同的井网,因此要考虑井网的整体布局,不仅要考虑地质特征、流体分布和产油能力,还要考虑平台的数量和位置,把每个井作为平台的不同结点,从而实现海上油田开发的整体优化设计.同样利用三维三相黑油模拟器,将地层进行网格划分,得到不同网格的储量分布情况以及生产指数,以净现值最大作为目标函数,建立海上油田井网优化的数学模型.做如下假设:

- (x_i, y_i, z_i) 为井 i 的位置, $i = 1, 2, \dots, n_w$, 并设第 i 口井的水平段长度为 l_i ,
- (x_j, y_j, z_j) 为平台 j 的位置, $j = 1, 2, \dots, n_p$, 当以平台所在平面为基准面时, $z_j = 0$,
- n_w 为总井数(包括水平井、分支井和直井),
- n_p 为平台数.

定义 i_j 为整数, $i_j = 0, 1$ 表示从平台 j 上钻井 i .

根据数值模拟结果,由储量分布和生产指数筛选靶点位置,用权重 W_i 表示,

$$W_i \begin{cases} \geq eco, & \text{if } i_j = 1 \\ = 0, & \text{if } i_j = 0 \end{cases}$$

建立如下目标函数:

$$\max_{i=1}^{n_w} \sum_{j=1}^{n_p} \left\{ \sum_{t=1}^T P(t) Q(t) T_{or} W_{if1}(l_i) (1 + R)^{-t} - C_v [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + z_i^2]^{1/2} - C_{if2}(l_i) \right\}$$

其中: $P(t)$ 为油价; $Q(t)$ 为水平井产量递减规律函数; T_{or} 为年生产时间; $f_1(l)$ 为水平井产能随长度变化的函数关系; R 为贴现率, T 为开发年限; C_v 为垂直段的费用系数,假设垂直段的钻

井费用与水平位移成线性关系; C_H 为水平段的费用系数; $f_2(l)$ 为水平段钻井费用与水平长度的关系函数.

约束条件如下:

(1) 平台与井的关系约束

$$\sum_{j=1}^{n_p} ij = 1, i = 1, 2, \dots, n_w$$

(2) 整数条件约束

$$ij = 0, 1$$

(3) 平台钻井能力约束

$$\sum_{i=1}^{n_w} ij - N_j < 0, j = 1, 2, \dots, n_p$$

N_j 为平台 j 的最大钻井能力,

(4) 水平段的长度约束

$l_i \geq l_{\min}$, l_{\min} 为水平井优于直井的最低长度界限, 由经济分析确定,
 $l_i \leq l_{\max}$, l_{\max} 为水平井最大长度界限, 由油藏条件及钻井工艺水平确定.

(5) 采油速度约束

$$\sum_{i=1}^{n_w} Q(t) T_{off1}(l_i) \geq Nv_o$$

N 为地质储量, v_o 为采油速度.

(6) 投资条件约束

$$\sum_{i=1}^{n_w} \left\{ C_v \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + z_d^2 \right]^{1/2} + C_H f_2(l_i) \right\} \leq C_{\max}$$

C_{\max} 为最大投资.

(7) 最大钻井半径约束

$$\left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + z_d^2 \right]^{1/2} \leq r_{\max}$$

r_{\max} 为最大钻井半径.

(8) 最大水平位移约束

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq h_{\max}$$

h_{\max} 为最大水平位移.

在以上数学模型中, 平台位置 (x_j, y_j, z_j) 及平台数 n_p , 井的位置 (x_i, y_i, z_i) 及井数 n_w 以及水平井水平段长度 l_i 都是未知变量, 所以上问题可归结为一个复杂的混合整数规划模型.

根据靶点的粗筛选, 设油藏可行域为 G , G 由不同层位的不同子集构成, 用每个子集域的顶点位置 V_i 来代表各个子集, 则 $\bigcup_i V_i = G$, 首先将不同层位的权重分配图 W_i 进行叠加, 将叠加后的区域图的顶点位置作为钻井平台的初始位置. 从初始位置开始采用交替分配算法变更平台的位置进行优化.

在某一个平台位置布局方式下, 要使目标函数取得极值, 必须满足:

$$\frac{\partial NPV}{\partial x_i} = 0, \frac{\partial NPV}{\partial y_i} = 0, \frac{\partial NPV}{\partial z_i} = 0$$

$$\frac{\partial NPV}{\partial l_i} = 0$$

在 (x_i, y_i, z_i) 的容许集范围以及约束条件下, 求解上述 $4n_w$ 个方程构成的方程组并不容易, 尤

其是当平台数和井数较多的情况下,对于这类问题采用混合遗传算法 MIGA 进行求解^[4]。

首先根据数值模拟不同井网设计,初步计算出井数、平台数,采用实数编码,将水平井靶点位置、水平井长度及平台的位置作为决策变量,用 X 表示,其中每个染色体都由决策变量构成。

遗传算法的步骤:

步骤 1 随机产生 M 个初始群体,判断个体的有效性,如果是无效个体,则继续随机生成初始个体,直至有效;

步骤 2 根据目标函数,评价群体适应度;

步骤 3 交叉操作,选择算术交叉,以某一交叉概率进行个体交叉操作:

$$X_1(t+1) = X_1(t) + (1 - \lambda) X_2(t)$$

$$X_2(t+1) = X_2(t) + (1 - \lambda) X_1(t)$$

步骤 4 选择均匀变异算子,对个体中每个基因座上的基因值,以某一变异概率从对应基因的取值范围内取一随机数来替换。在每一代的遗传中,保留目前的最优解直接到下一代中,直到达到精度要求或最大代数;

步骤 5 将最好的染色体作为最优解。

通过以上算法,经过有限次迭代,得出了两个平台 46 口井的位置及井的长度,由于解空间的复杂性,以上算法也不能保证所得出的解即为全局最优解,因此必须继续对此类问题的求解方法进行研究,以求得全局最优解。

4. 结束语

通过不同井网模式的数值模拟研究及经济分析得知海上油田开采用水平井九点法井网能够得到较高的经济效益。提出了考虑钻井平台位置的海上油田井网优化模型,在整体井网随机模拟优化过程中要根据井组模拟结果对井网的模式进行约束,尽可能采取有利的井网形式。在求解井网优化模型之前,还要对不同井网形式下的水平井的产量进行油藏工程研究,推导出水平井的产量公式并确定递减规律。

参 考 文 献

- [1] Sevgi Dogru, Selection of Optimal Platform Locations, SPE 10754.
 [2] Hyun Cho, Integrated Optimization on Long Horizontal Well Legngty, SPE 68599.
 [3] 杨皆平,樊洪海,油气钻井工程技术经济评价的内容和方法[J],石油钻探技术,29:6(2001),56-58.
 [4] 丰建荣,刘志河,刘正和,混合整数规划问题遗传算法的研究及仿真实现[J],系统仿真学报,16:4845-848.

OFFSHORE OIL FIELD WELL PATTERN ASSESSMENT AND OPTIMIZATION

Fan Haijun L üAimin YaoJun Du Dianfa

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, 257061)

Abstract This paper conducts some performance study and economic assessments of different well patterns on offshore oil field through numerical simulation and points that nine - point pattern is the best well pattern for the development of offshore oil field. A mixed integer programming mathematical model is then presented for the optimization of platforms and horizontal wells of offshore oilfield and the application of genetic algorithm method to the solving of this model is also discussed.

Keywords offshore ,oil field development ,well pattern ,economic assessment.