

Optimized Gas Allocation for Continuous Gas Lift Well Group

Junliang Li, Ruiquan Liao, Wei Luo, Yue Han

School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Laboratory of Multiphase Pipe Flow, CNPC, Wuhan Hubei
Email: lijunliang01@163.com

Received: Dec. 3rd, 2015; accepted: Jan. 18th, 2016; published: Jun. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The optimized gas allocation for a continuous gas lift well group could enhance the utilization efficiency of injected gas. In consideration of the surface gathering pipelines and the interference between each oil well, an optimized gas allocation model of the gas lift well group was established to maximize the liquid production rate. According to the node analytical principle, the inflow curve of each node in the well pattern was determined, therefore the relationship between the injection gas rate and the liquid production rate was established. Based on the previous study, the genetic algorithm is adopted to solve the model. By taking a well group with six oil wells for example, the reasonable total gas injection rate is determined, and then optimized gas allocation in single well is implemented.

Keywords

Continuous Gas Lift, Optimized Gas Allocation, Node Analysis, Genetic Algorithm

连续气举井组优化配气研究

李军亮, 廖锐全, 罗威, 韩悦

长江大学石油工程学院, 中国石油天然气集团公司气举试验基地多相管流实验室, 湖北 武汉
作者简介: 李军亮(1977-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事油气田开发、系统控制与优化方面的研究。
Email: lijunliang01@163.com

收稿日期: 2015年12月3日; 录用日期: 2016年1月18日; 发布日期: 2016年6月15日

摘要

连续气举井组优化配气可以提高注入气的利用效率。考虑地面集输管线以及油井之间的相互干扰, 建立了以产液量最大为目标的气举井组优化配气模型。根据节点分析原理, 确定井网中各个节点的流入曲线, 从而得到注气量和产液量之间的关系; 在此基础上, 采用遗传算法求解模型。以一个6口气举井井组为例, 确定其合理的总注气量, 然后进行单井优化配气。

关键词

连续气举, 优化配气, 节点分析, 遗传算法

1. 引言

气举井组优化配气是指将合理的注气量优化分配到各个气举井。目前对优化配气问题的研究主要包括模型研究和求解方法研究。以产量最大为目标的最优化模型目前研究最多[1]-[7], 另外还有以效益最大化为优化目标的最优化模型[8]。综合考虑产量和成本, 有的学者建立了双目标模型, 如以产量和效益最大为目标的双目标优化模型[9]以及以产量最大、注气量最小为目标的双目标优化模型[10]。这些模型都是非线性优化模型, 很难得到解析解。对优化配气模型目前有不同的求解方法, 例如遗传算法[6] [10]、粒子群算法[5], 也有的采用商业软件进行求解[8]。不管采用何种求解方法, 最关键的都是确定注气量和产液量之间的关系, 即气举井的动态曲线[11]。由于气举井动态曲线计算复杂, 将动态曲线回归成数学模型[2] [3] [8] [9], 可以大大减小计算量。气举井动态曲线反应的是注气系统、油井系统和地面集输系统之间的协调关系, 其中任何一个子系统参数改变都会影响动态曲线的形状, 因此在建立气举井组优化配气模型的时候, 一定要考虑三个子系统之间的平衡。但目前的研究往往忽略了地面集输系统, 即忽略了油井之间的相互干扰, 这是不科学的。笔者考虑油井之间的相互干扰, 建立了气举井组优化配气模型, 并根据节点分析的原理利用遗传算法求解。

2. 气举井组优化配气模型

如图 1 是气举井组系统示意图, 其中压缩机是系统的出发点, 分离器是系统的终端, 二者构成了整个系统的边界条件。油井和管网是整个系统的主体部分。管网包括注气管网和输油管网。如果认为压缩机和注气管网可以保证每口气举井的注气压力和注气量, 那么注气管网产生的压力损失就可以不做考虑。输油管网将每口气举井的井口连接起来, 使井和井之间产生干扰, 主要表现为一口气举井的井口压力或

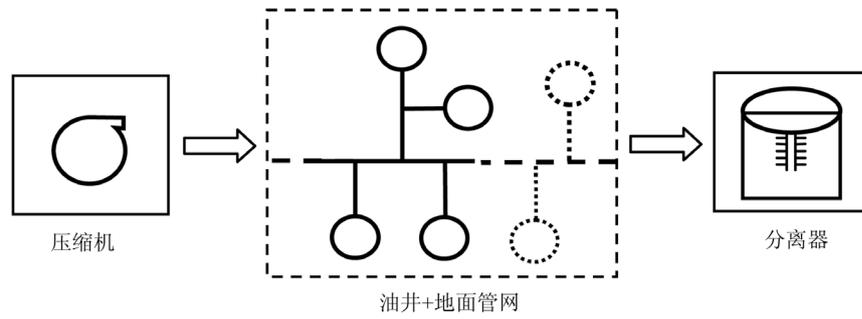


Figure 1. The system of gas lift well group
图 1. 气举井组系统示意图

产液量发生变化,都会通过输油管网作用于其他气举井,使其他气举井的井口压力和产液量也随之变化,最后整个输油管网达到新的平衡。这种干扰也可以表现为任何一口气举井的注气量发生变化,都会使其他气举井的合理注气量也随之发生变化。

建立如下以产液量最大为目标的最优化方程:

$$Q_{\max} = \sum_{i=1}^n q_i(q_{gi}) \quad (1)$$

式中: n 是井数; Q_{\max} 是最大产液量, m^3/d ; q_{gi} 为单井注气量, m^3/d ; q_i 为单井产液量, m^3/d 。

约束条件包括:

1) 总气量的约束。每口井的注气量之和应等于总气量, 即

$$Q_g = \sum_{i=1}^n q_{gi} \quad (2)$$

式中: Q_g 为总注气量, m^3/d 。

2) 单井注气量的约束。为了防止供液能力好的油井得到太多的注气量而使采液速度过快, 同时防止供液能力差的油井得不到足够的注气量而使采液速度过慢, 所以需要对单井注气量进行限制。即:

$$q_{gi\min} \leq q_{gi} \leq q_{gi\max} \quad (3)$$

式中: $q_{gi\min}$ 、 $q_{gi\max}$ 分别为单井允许最小和最大注气量, m^3/d 。

3) 分离器条件的限制。分离器的约束有两种情况, 一个是液量约束, 一个是压力约束。该模型对分离器工作压力进行约束, 即:

$$p_s = p_{\text{sep}} \quad (4)$$

式中: p_s 、 p_{sep} 分别是分离器工作压力和分离器限定工作压力, MPa 。

由于气体流动摩擦力小, 而且输气管网阀门多, 所以笔者不考虑注气管网的压力损失, 井口注气压力按定值计算。

综上所述, 得到最优化配气模型如下:

$$\begin{cases} Q_{\max} = \sum_{i=1}^n q_i(q_{gi}) \\ Q_g = \sum_{i=1}^n q_{gi} \\ q_{gi\min} \leq q_{gi} \leq q_{gi\max} \\ p_s = p_{\text{sep}} \end{cases} \quad (5)$$

3. 模型的解法

该模型是一个非线性最优化模型，采用遗传算法求解。该算法的基本原理是随机产生一组解，作为初始种群，根据适应度进行选择，然后交叉、变异，从而产生下一代种群。每一代都要优选适应度高的解进行交叉、变异，不断循环，种群逐渐向最优解靠近，最终达到最优或者非常接近最优。该算法最关键的是适应度的计算，即根据每口井的注气量得到相应的产液量。考虑气举井之间的相互干扰，可根据节点分析的原理，利用气举井动态曲线求解。

假设有一个 n 口井和一个分离器组成的气举井生产系统，如图 2。分 2 种情况进行分析。

第 1 种情况，不考虑地面集输管线，即井口压力恒定，油井之间不存在相互干扰。按以下步骤求解：

1) 在给定的井口压力下绘制 n 口气举井的动态曲线，如图 3。

2) 对任何一个解 $(q_{g1}, q_{g2}, \dots, q_{gn})$ ，根据动态曲线都可以求得对应的产液量 (q_1, q_2, \dots, q_n) ，进一步可以得到适应度，即 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 。

第 2 种情况，考虑地面集输管线，油井之间存在相互干扰。分离器压力恒定，作为边界条件。当地面集输管线压力波动时，会影响油井产液量，其影响关系可以用不同注气量下井口压力与产液量之间的关系曲线来表示，如图 4。根据节点分析的原理，该曲线即为以井口为节点的流入曲线。适应度求解步骤如下：

1) 绘制每口井在不同的注气量下以井口为节点的流入曲线。

2) 对任何一个解 $(q_{g1}, q_{g2}, \dots, q_{gn})$ ，利用插值的方法，求每口气举井井口的流入曲线。节点 A 的流体来自井 1 和井 2。对于井 1，在流入曲线上取一系列点，根据多相管流理论，计算至节点 A 处，得到井 1 对于节点 A 的流入曲线。同理，可以得到井 2 对于节点 A 的流入曲线，如图 5。

3) 当节点 A 压力为 p_{Ai} ，由图 5 可以得到井 1 和井 2 分别流入节点 A 的液体流量 q_{1i} 和 q_{2i} ，节点 A 的液量为 $q_{Ai} = q_{1i} + q_{2i}$ 。以此方法可以得到一系列 $(p_{A1}, q_{A1}), (p_{A2}, q_{A2}), \dots, (p_{Am}, q_{Am})$ 。即得到了节点 A 的流入曲线。如图 6。

4) 根据上述方法，可以进一步得到每个节点的流入曲线以及以分离器为节点的流入曲线，如图 7。根据设定的分离器压力 p_{sep} ，由分离器的流入曲线可以得到总液量 Q ，即该解的适应度。

4. 实例分析

图 8 为某油田由 6 口气举井、3 个节点(A、B、C)以及分离器组成的气举井组。基本参数见表 1 和表 2。

取分离器压力为 1 MPa 作为边界条件。首先确定合理的总注气量。取一系列总注气量，按上述方法可以得到对应的一系列总液量，结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，随着注气量增加，产液量逐渐增加，增加的幅度逐渐减小。如果注气量以每增加 10,000 m³ 气液量增加 10 m³ 作为最低标准，则总注气量选择 130,000 m³/d 为最合理。对应的优化配气方案见表 3。

5. 结论

1) 油井通过地面集输管网相互干扰，一口气举井的生产参数发生变化，都会影响其他气举井的生产状态。在任何一种条件下气举井组和地面集输管网都处于平衡状态，进行气举井组优化配气必须考虑这种干扰，结果才更合理，更接近实际情况。

2) 气举井组优化配气模型是一个非线性最优化模型，而且产液量和注气量之间没有显式函数表达式。采用节点分析的原理，根据气举井的动态曲线，利用插值的方法，确定各节点的流入曲线，进一步得到

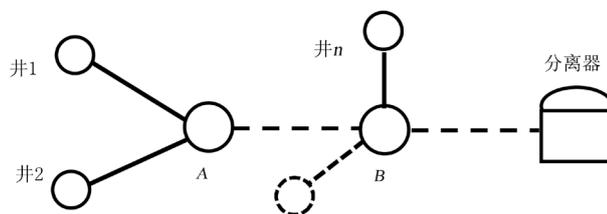


Figure 2. The product system of gas lift well
图2. 气举井生产系统

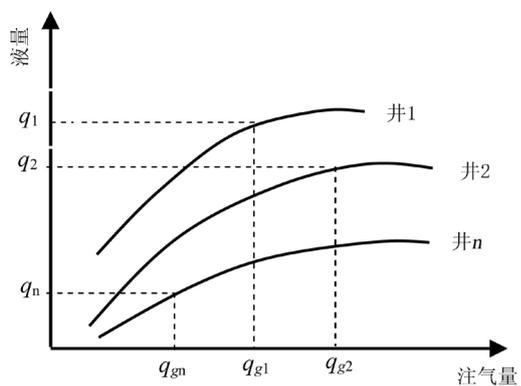


Figure 3. The performance curve of gas lift well
图3. 气举井动态曲线

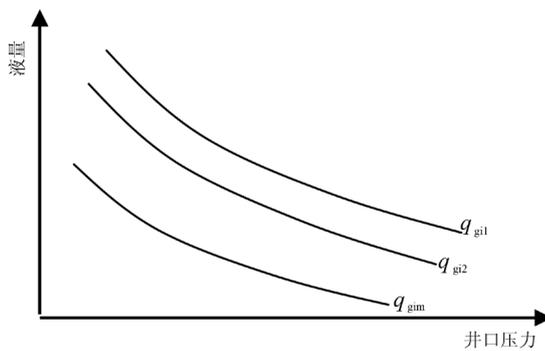


Figure 4. The well head's inflow curve of the i^{th} well
图4. 第 i 口井井口流入曲线

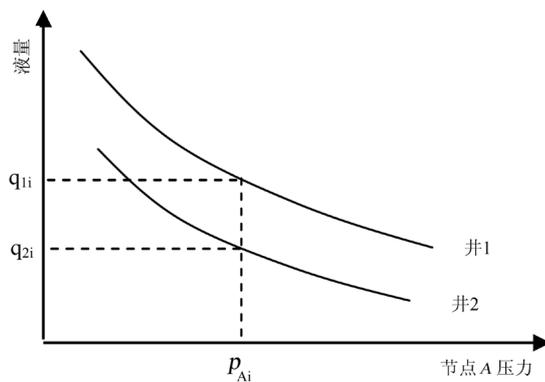


Figure 5. The inflow curve of well 1 and well 2 at the node A
图5. 井1、井2在节点A的流入曲线

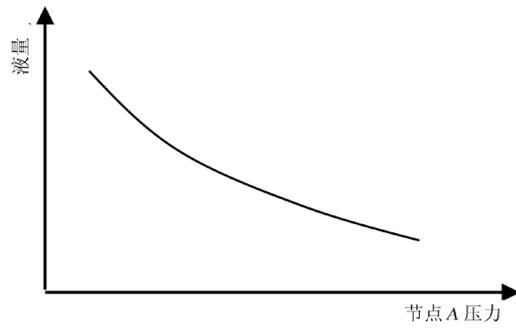


Figure 6. The inflow curve of node A
图 6. 节点 A 的流入曲线

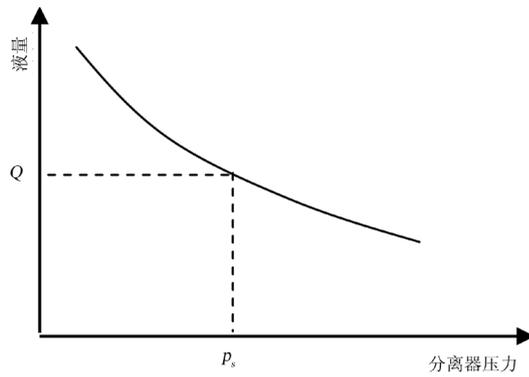


Figure 7. The inflow curve of extractor
图 7. 分离器流入曲线

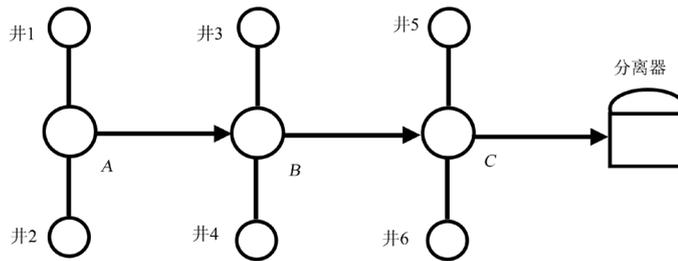


Figure 8. The product system of gas lift well of the oilfield
图 8. 某油田气举井生产系统

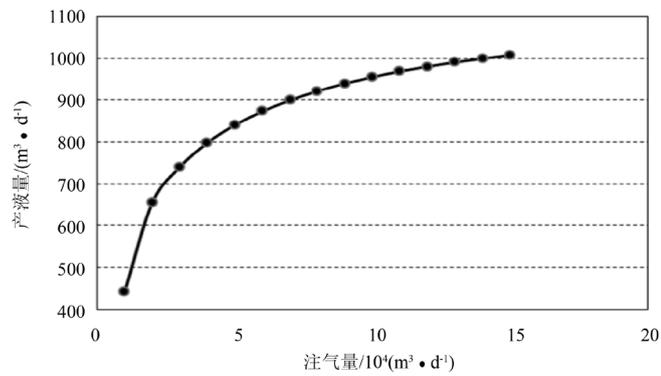


Figure 9. The relation curve of total injection gas rate and liquid rate
图 9. 总注气量和产液量关系曲线

Table 1. The well's basic parameters**表 1.** 油井基本参数

井号	产液指数/($\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{MPa})^{-1}$)	含水率/%	地层静压/MPa
井 1	15.1	20	23.4
井 2	14.2	25	24.7
井 3	16.3	14	24.6
井 4	11.4	20	23.1
井 5	15.7	31	25.5
井 6	17.8	15	27.1

Table 2. The basic parameters of collector pipeline**表 2.** 集输管线基本参数

管段	内径/mm	长度/m
油井→节点	101.6	300
节点→节点	127.0	500
节点→分离器	152.4	2500

Table 3. The result of optimum gas allocation**表 3.** 优化配气结果

井号	注气量/ 10^4 m^3	产液量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产油量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
井 1	2.251	146.6	117.3	29.3
井 2	1.903	110.7	83.0	27.7
井 3	2.125	226.4	194.7	31.7
井 4	2.350	173.9	139.1	34.8
井 5	2.228	179.6	123.9	55.7
井 6	2.145	153.6	130.6	23.0
合计	13.000	990.8	788.6	202.2

注气量和产液量之间的关系，然后采用遗传算法求解。这种求解思想大大减小了计算量。

3) 注气量和产液量之间的关系是根据各节点流入曲线插值求解，所以步长越短，求解精度越高，计算量越大。根据遗传算法的特点，建议多次计算，选择最优解。

基金项目

国家自然科学基金项目(NO. 61572084)。

参考文献 (References)

- [1] Nishikiori, N., Redner, R.A., Doty, D.R., *et al.* (1995) An Improved Method for Gas Lift Allocation Optimization. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, **117**, 87-92.
- [2] 钟海全, 李颖川, 刘永辉, 等. 气举井组及油田优化配气方法研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(5): 27-30.
- [3] 钟海全, 李颖川, 刘永辉. 用混合罚函数法求解气举区块优化配气模型[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 146-150.
- [4] 廖锐全, 张柏年. 深井连续气举系统的参数设计及优化配气方法[J]. 中国海上油气, 1999, 11(1): 51-56.
- [5] Hamed, H., Rashidi, F. and Khomehch, E. (2011) A Novel Approach to the Gas-Lift Allocation Optimization Problem. *Petroleum Science and Technology*, **29**, 418-427. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460903394110>

- [6] Ghaedi, M., Ghotbi, C. and Aminshahidy, B. (2013) Optimization of Gas Allocation to a Group of Wells in Gas Lift in One of the Iranian Oil Fields Using an Efficient Hybrid Genetic Algorithm (HGA). *Petroleum Science and Technology*, **31**, 949-959. <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2010.535081>
- [7] Pudjo, S., Deni, S. and Silvy, D. (2009) Optimization of Gas Injection Allocation in a Dual Gas Lift Well System. *Journal of Energy Resources Technology*, **131**, 1011-1017.
- [8] Khishvanda, M., Khamehchi, E. and Nokandeh, N.R. (2015) A Nonlinear Programming Approach to Gas Lift Allocation Optimization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **37**, 453-461. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2011.584118>
- [9] 刘想平, 张柏年, 汪崎生, 等. 连续气举单元多目标优化配气方法[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 59-62.
- [10] 罗银富, 黄炳光, 王怒涛, 等. 改进的非支配排序遗传算法优化气举配气[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 64-66.
- [11] Mayhill, T.D. (1974) Simplified Method for Gas Lift Well Problem Identification and Diagnosis. *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, Houston, Texas, 6-9 October 1974, SPE5151.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>