

## 气举井组及油田优化配气方法研究\*

钟海全<sup>1</sup>，李颖川<sup>2</sup>，刘永辉<sup>1</sup>

(1 西南石油学院，四川成都 610500；

2 “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院，四川成都，610500)

**摘要：**概述了气举井组优化配气的发展现状，分析了各种类型的气举特性曲线的特点。考虑到现场的实用性和合理性，将单井最大产油量值前的气举特性曲线数据拟合为二次多项式方程，并定义井组特性曲线为井组注气量与井组最大产油量的关系曲线。完善了井组优化配气模型并建立了油田优化配气非线性数学模型，并提出了一种求解非线性优化配气模型的新方法——惩罚函数法，为了提高模型的求解速度，提出了一种估计初始注气量的新方法——最大配气量法。惩罚函数法能处理等式约束与不等式约束，收敛速度通常只受初始注气量的影响。应用本文提出的新方法求解了井组及油田配气数学模型，最后给出了A、B井组的配气结果。

**关键字：**优化配气，特性曲线，数学模型，非线性约束，惩罚函数法

### 引言

Mayhill<sup>[1]</sup>是气举井组优化配气理论和方法研究的先驱者，他分析了连续气举井注气量和产油量的关系，并称其为“特性曲线”，定义最佳注气量为注气增加的费用刚好等于增加利润的某一百分数时的注气量。Radden<sup>[2]</sup>等人提出了连续气举系统确定最佳配气的分析方法，开发了优化配气的计算程序。Gomez<sup>[3]</sup>提出将单井气举特性曲线处理为二次多项式，然后将增加的气量添加到增油量最大的井上。Kanu<sup>[4]</sup>等人首先应用了等斜率配气并提出了经济斜率公式。Nishikiori<sup>[5]</sup>等人采用拟牛顿非线性优化技术求解最佳注气点，但其约束条件只考虑了下限。Hong<sup>[6]</sup>研究了相关变量对连续气举系统的影响，并采用三次样条插值法估测气举特性曲线。Buitrago<sup>[7]</sup>等人给出了一种随机域探测法和下降方向试探法的组合式方法，该方法可避免得到的是局部最优解。

概括起来，气举系统优化配气可以归纳为两条不同的途径：

- 1 以经济最优化为目标，最佳注气量由递增的注气量成本刚好等于从递增的产油量中取得的利润来确定。Mayhill、Radden 等人以及 Kanu 等人提出的方法都属于此类。
- 2 以从井组中获得最大产油量为目标来确定最佳注气量，Hong、Gomez、N.Nishikiori 等人、Buitrago 等人提出的方法属于这一类。

Hong 和 Gomez 确定最佳注气量的方法是类似的，只是产生气举特性曲线方程的方法不同，实质是一种枚举法。该方法计算量大，且计算精度不高；Nishikiori 等人采用拟牛顿法，约束条件处理较为复杂，计算速度较慢；Buitrago 等人采用的方法计算量较大，运算速度不高。本文以最大产油量为目标，采用惩罚函数外点法先对井组单井配气，绘制各井组特性曲线，再对油田各井组配气。

\*本文系国家自然科学基金项目(50374057)部分研究成果。

## 数学模型

### 1 单井气举特性曲线

单井气举特性曲线形状取决于注气量对产油量的响应，典型的气举特性曲线如图 1 所示。曲线 A 属于能自喷的井；曲线 B 属生产能力较强的井，只要一注气就能生产；曲线 C 属需要一定注气量才能启动生产的井；曲线 D 与曲线 C 类似，但是存在一个跳跃。

单井气举特性曲线可以采用节点分析方法计算或者现场测试得到。这样得到的气举特性曲线是一些离散的点，为了通过计算机运用最优化技术向各井分配气量，需将这些离散点通过数值拟合为曲线方程。本研究将气举特性曲线应用最小二乘法拟合为二次多项式，特性曲线数学回归模型如下：

$$q_o = Aq_g^2 + Bq_g + C \quad (1)$$

因为注气能力有限，往往配气配不到最大值，因此只将最大产油量值前的气举特性曲线数据拟合，这将提高计算速度和精度。

### 2 井组气举特性曲线

井组特性曲线定义为井组注气量与井组最大产油量的关系曲线。与单井气举特性曲线相比，一般不存在 C、D 类曲线（如图 5 和图 6），如存在也可按本文处理单井的方式处理，并且只存在上升段。

井组特性曲线可以通过井组单井优化配气得到，这样得到的特性曲线也是一些离散的点。本文通过大量的计算分析，表明其形状符合二次多项式规律。

### 3 井组优化配气模型

设某井组有  $n$  口井，构成集合  $N$ ，井组总产油量  $Q_{oTOT}$ ，单井产油量为  $q_{oi}$ ，单井注气量为  $q_{gi}$ ，则数学式如下：

$$Q_{oTOT} = \sum_{i=1}^n q_{oi} = f(q_g) = f(q_{g1}, q_{g2}, \dots, q_{gn}) \quad (2)$$

上式中  $q_g$  表示如下向量：

$$q_g = (q_{g1}, q_{g2}, \dots, q_{gn})^T \quad (3)$$

井组最大产油量表示为：

$$\text{Max} Q_{oTOT} = \text{Max} f(q_{g1}, q_{g2}, \dots, q_{gn}) \quad (4a)$$

将式(1)代入式(4a)得：

$$\text{Max} Q_{oTOT} = \text{Max} \sum_{i=1}^n (A_i q_{gi}^2 + B_i q_{gi} + C_i) \quad (4b)$$

由式(1)，单井最大产油量对应的注气量为

$$q_{gi\max} = -\frac{B_i}{2A_i} \quad (5)$$

故井组最大产油量对应的总注气量为

$$Q_{g\max} = \sum_{i=1}^n -\frac{B_i}{2A_i} \quad (6)$$

由式(6)可得如下结论：

如果系统可获得的最大注气量  $Q_{gAT}$  大于  $Q_{g\max}$ ，总注气量不会对系统构成约束；反之则会，总注气量约束为

$$\sum_{i=1}^n q_{gi} = Q_{gAT} \quad Q_{gAT} \leq Q_{g\max} \quad (7a)$$

对于图 1 中 A、B 类特性曲线的井，构成集合 I，其单井约束条件为

$$0 \leq q_{gi} \leq q_{gi\max} \quad (7b)$$

对于图 1 中 C、D 类特性曲线的井，构成集合 J，其约束条件为

$$q_{gimin} \leq q_{gi} \leq q_{gi\max}$$

$$\text{或 } q_{gi} = 0 \quad (7c)$$

式中  $q_{gimin} > 0$

综上所述，可得到如下以产油量最大化为目标的优化配气模型：

$$\begin{cases} \text{Max } Q_{oTOT} = \text{Max} \sum_{i=1}^n (A_i q_{gi}^2 + B_i q_{gi} + C_i) \\ \sum_{i=1}^n q_{gi} = Q_{gAT} \\ 0 \leq q_{gk} \leq q_{gk\max} \\ q_{gimin} \leq q_{gj} \leq q_{gj\max} \text{ 或 } q_{gj} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $k \in I, j \in J, J \cup I = N, J \cap I = \Phi$ ， $\Phi$  为空集。

#### 4 油田优化配气模型

设油田有  $m$  个井组，井组总采油量  $Q_{oT}$ ，总注气量为  $Q_{gT}$ ，井组注气量为  $Q_{gj}$ ，则油田优化配气数学模型如下：

$$\begin{cases} \text{Max } Q_{oT} = \text{Max} \sum_{j=1}^m (A_j Q_{gj}^2 + B_j q_{gj} + C_j) \\ \sum_{j=1}^m Q_{gj} = Q_{gT} \\ 0 \leq Q_{gj} \leq Q_{gj\max} \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

## 非线性优化方法

对于带有约束条件的非线性规划问题的数值计算方法，通常有直接法和间接法两种。锯齿法、投影梯度法、复合法以及现代优化技术的遗传算法等属于直接法；惩罚函数法、增广乘子法等属于间接法。惩罚函数法是处理约束条件的比较常用的方法，通过在适应值函数上添加一个惩罚项，就将原来的约束问题变成了无约束问题，惩罚函数法简单易行，计算速度也较快。本研究采用惩罚函数外点法求解式(8)和式(9)。

### 1 分解约束

首先考虑  $q_{gi}$  不等于零，则约束条件可以改写为如下形式：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n q_{gi} = Q_{gAT} \\ q_{gi\max} - q_{gi} \geq 0 \\ q_{gi} - q_{gi\min} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中  $q_{gi\max} > 0$ ， $q_{gi\min} < 0$ 。

考虑  $q_{gj}$  等于零，即不向 C、D 类特性曲线井配气，令有  $k$  口井，则约束条件可以改写为如下形式：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k q_{gi} = Q_{gAT} \\ 0 \leq q_{gi} \leq q_{gi\max} \quad i = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (11)$$

### 2 求解步骤

- (1) 给定初始点  $q_g^0$ ，初始惩罚因子  $c^k$ ，放大序列  $c^k$ ，允许误差  $\epsilon$ ，令  $k = 1$ ；
- (2) 以  $q_g^{(k-1)}$  为初始点，求解无约束问题

$$\max f(q_g) + F_1(q_g, \delta) + F_2(q_g, \delta)$$

设其极大点为  $q_g^k$ ，上式中  $F_1$ ， $F_2$  分别为等式约束惩罚项和不等式约束惩罚项；

- (3) 若  $F_1(q_g^k, \delta) + F_2(q_g^k, \delta) < \epsilon$ ，则停，得近似解  $q_g^k$ ；否则，令  $\delta^k = c^k \delta$ ，返回(2)继续计算。

### 3 初始注气量

采用惩罚函数优化技术需要给定初始注气量  $q_g^0$ ，它必须满足所有的约束表达式。初始值给定好坏将直接影响迭代次数，甚至迭代收敛与否以及收敛速度。通常用如下的方法给定初始值：

#### (1) 采油指数法<sup>[4]</sup>

按各井采油指数占井组采油指数的份额。

$$q_{gi}^0 = Q_{gAT} \frac{PI_i}{\sum_{i=1}^n PI_i}$$

(2) **最大产油量法**<sup>[4]</sup>

按各井最大采油量占井组最大采油量的份额。

$$q_{gi}^0 = Q_{gAT} \frac{q_{oi\max}}{\sum_{i=1}^n q_{oi\max}}$$

(3) **最大配气量法**

按各井最大注气量占井组最大注气量的份额。

$$q_{gi}^0 = Q_{gAT} \frac{q_{gi\max}}{\sum_{i=1}^n q_{gi\max}}$$

由单井气举特性曲线容易得到各口井的最大配气量，各口井的最大配气量之和即为井组最大配气量，再按上式计算每口井的初始配气量，按此方法得到的初始值与最优值更为接近。

## 应用示例

油田有 A、B 两井组（如图 2 所示），A 井组有 10 口井，B 井组有 8 口井，分别如图 3 和图 4 所示，其拟合特性曲线各项系数分别列入表 1 和表 2。配气结果分别列入表 3~表 4。B 井组 Well 8 井属于 C、D 类井，如果 well 8 井配气为 0，则配气结果如表 5。比较表 4 与表 5 可以发现，当总注气量较小时，不对 C、D 类型的井配气可能系统总产量会更大，当注气量较大时则可能相反，因此对同时存在 A、B 类与 C、D 类型的井时，应分别考虑。A、B 井组特性曲线如图 5~图 6，不同注气量井组配气结果如表 6。

表 1 A 井组井特性曲线各项系数

井名	系数 A	系数 B	系数 C
Well 1	-5	50	0.1
Well 2	-8	40	10
Well 3	-4	30	2
Well 4	-2	16	20
Well 5	-4.1	16	40
Well 6	-8	70	0.5
Well 7	-7.4	46	0.7
Well 8	-11	60	1
Well 9	-10	100	0.3
Well 10	-10	60	30

表 2 B 井组井特性曲线各项系数

井名	系数 A	系数 B	系数 C
Well 1	-3	40	20
Well 2	-2	18	12.5
Well 3	-4	28.6	40
Well 4	-2	18	15
Well 5	-1.1	6.8	40
Well 6	-5	40	18
Well 7	-4.2	44	31
Well 8	-8	50	-50

表 3 A 井组不同注气量配气结果（油产量，m<sup>3</sup>/d）

井名	总注气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)							
	10		20		30		最大值	
	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量
Well 1	0.00	0.10	4.71	124.67	4.42	123.43	5.00	125.10
Well 2	0.00	10.00	0.94	40.59	2.14	58.95	2.50	60.00
Well 3	0.71	21.26	1.88	44.33	3.03	56.16	3.75	58.25
Well 4	0.00	20.00	0.00	20.00	2.55	47.81	4.00	52.00
Well 5	0.00	40.00	0.00	40.00	1.25	53.57	1.95	55.61
Well 6	2.35	120.96	2.94	137.20	4.01	152.58	4.38	153.63
Well 7	0.00	0.70	1.08	41.65	2.72	71.06	3.11	72.19
Well 8	1.57	68.07	2.14	79.02	2.46	82.06	2.73	82.82
Well 9	3.48	227.30	3.95	239.35	4.71	249.46	5.00	250.30
Well 10	1.88	107.54	2.35	115.82	2.71	119.16	3.00	120.00
合计	9.99	615.93	19.99	882.633	29.99	1014.23	35.41	1029.89

表 4 B 井组不同注气量配气结果 (油产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ )

井名	总注气量 ( $10^4\text{m}^3/\text{d}$ )							
	10		20		30		最大值	
	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量
Well 1	3.31	119.51	4.86	143.59	6.15	152.56	6.67	153.33
Well 2	0.00	12.50	1.80	38.38	3.73	51.82	4.50	53.00
Well 3	0.00	40.00	2.22	83.81	3.19	90.53	3.58	91.12
Well 4	0.00	15.00	1.80	40.88	3.73	54.32	4.50	55.50
Well 5	0.00	40.00	0.00	40.00	1.69	48.36	3.09	50.51
Well 6	1.99	77.71	2.92	92.15	3.69	97.53	4.00	98.00
Well 7	2.84	122.08	3.95	139.28	4.87	145.68	5.24	146.24
Well 8	1.87	15.44	2.45	24.47	2.93	27.83	3.13	28.13
合计	10.01	442.24	20.00	602.57	29.99	668.63	34.61	675.83

表 5 B 井组不同注气量配气结果 (油产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ , Well 8 不配气)

井名	总注气量 ( $10^4\text{m}^3/\text{d}$ )							
	10		20		30		最大值	
	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量
Well 1	3.57	124.62	5.27	147.47	6.49	153.24	6.67	153.33
Well 2	0.00	12.50	2.40	44.20	4.23	52.86	4.50	53.00
Well 3	1.26	69.58	2.53	86.72	3.44	91.05	3.58	91.12
Well 4	0.00	15.00	2.40	46.70	4.23	55.36	4.50	55.50
Well 5	0.00	40.00	0.00	40.00	2.60	50.25	3.09	50.51
Well 6	2.14	80.77	3.16	94.48	3.89	97.94	4.00	98.00
Well 7	3.03	125.73	4.24	142.05	5.11	146.17	5.24	146.24
合计	10.00	468.20	20.00	601.62	29.99	646.87	31.58	647.70

表 6 不同注气量井组配气结果 (油产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ )

井组名	总注气量 ( $10^4\text{m}^3/\text{d}$ )					
	20		40		60	
	注气量	产油量	注气量	产油量	注气量	产油量
A	16.27	803.10	23.92	954.16	31.57	1023.87
B	3.72	306.94	16.08	550.82	28.43	663.35
合计	19.99	1110.04	40.00	1504.98	60.00	1687.22

## 结论

1. 在气量不足条件下, 只拟合最大产油量值前的气举特性曲线数据是符合油田实际的;
2. 考虑到油田全局优化配气定义了井组气举特性曲线;
3. 本文完善了井组优化配气模型并建立了油田优化配气模型;

4. 提出了应用惩罚函数外点法求解非线性优化配气模型，该方法简单易行；
5. 提出了一种估计初始注气量的新方法，该方法按各井最大注气量占井组最大注气量的份额分配气量，通过算例表明该方法切实可行。
6. 本文给出了同时存在 A、B、C、D 类型气举特性曲线的井组配气处理方法。
7. 开发了以最大产量为目标的优化配气程序。

### 参考文献

- [1] Mayhill.T.D,1974, " Simplified Method for Gas Lift Well Problem Identification and Diagnosis",Paper SPE 5151,SPE 49<sup>th</sup> Annual Fall Meeting,Houston,TX.
- [2] Radden,J.D.Sherman,T.A.G.and Blann,J.R,1974, " Optimizing Gas Lift Systems",Paper SPE 5151,SPE 49<sup>th</sup> Annual Fall Meeting,Houston,TX.
- [3] Gomez.V,1974, " Optimization of Continuous Flow Gas Lift System,"M.S.thesis,Universty of Tulsa,OK.
- [4] Kanu.E,Mach,J.M,and Brown,K.E,1981, " Economic Approach to oil Production and Gas Allocation in Continuous Gas Lift",JPT,J.Pet.Technol,33,pp.1887-1892.
- [5] N.Nishikiori,N.Redner,R.A,Doty,D.R,and Schmidt,Z,1995, " An Improved Method for Gas Lift Allocation Optimization",ASME J.Energy Resource,Technol,117,pp.87-92.
- [6] Hong.H.T,1975, " Effect of Variables on Optimization of Continuous Flow Gas Lift System",M.S.thesis,University of Tulsa ,OK.
- [7] Buitrago.s.etc, " Global Optimization Techniques in Gas Allocation for Continuous Flow Gas Lift System.
- [8] Kunal Dutta-Roy,SPE and James Kattapuram, " A New Approach to Gas Lift Allocation Optimization",SPE 38333.
- [9] Gabriel A.Alarcon Carlos F.Torres, " Global Optimization of Gas Allocation to a Group of Wells in Artificial Lift Using Nonlinear Constrained Programming",Transaction of ASME,2002.10.VOL.124,262-268.

### 附录

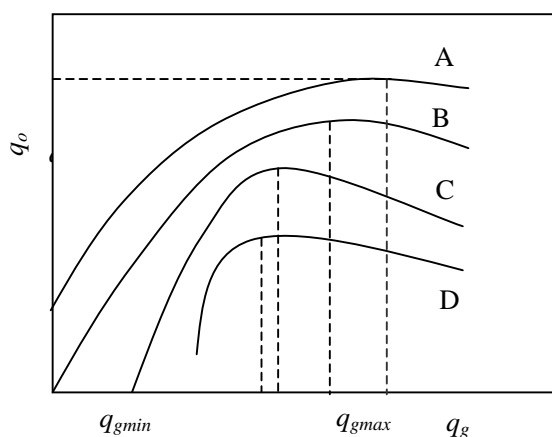


图 1 气举特性曲线类型



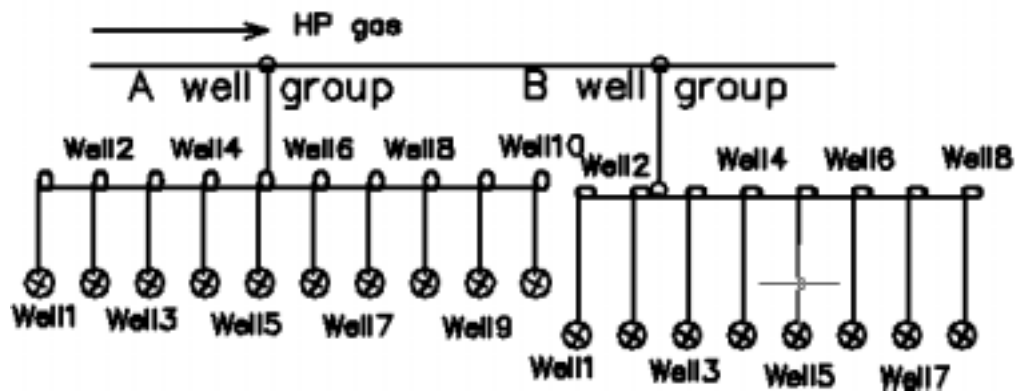


图 2 油田油井网络示意图

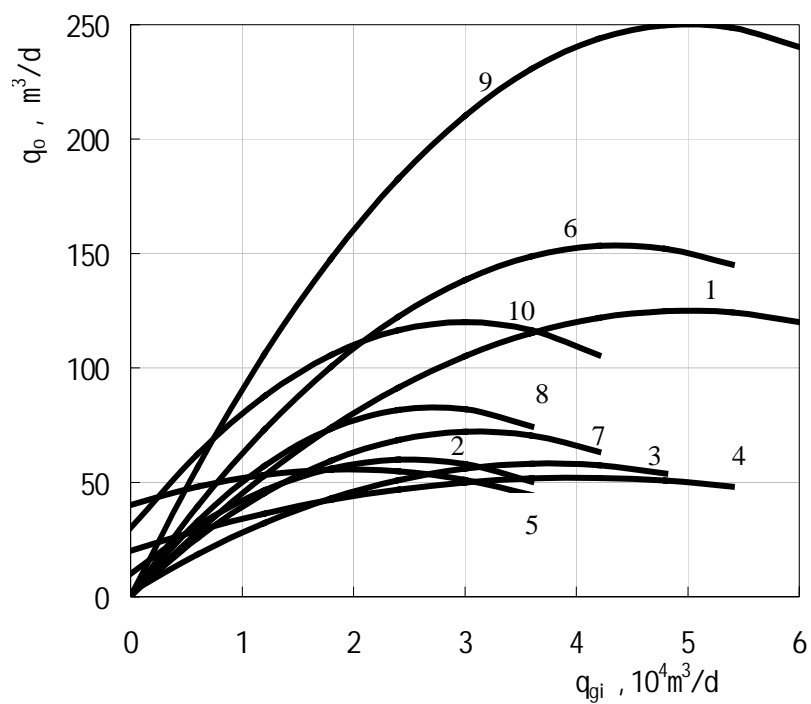


图 3 A 井组各井特性曲线(图中的数值指井号)

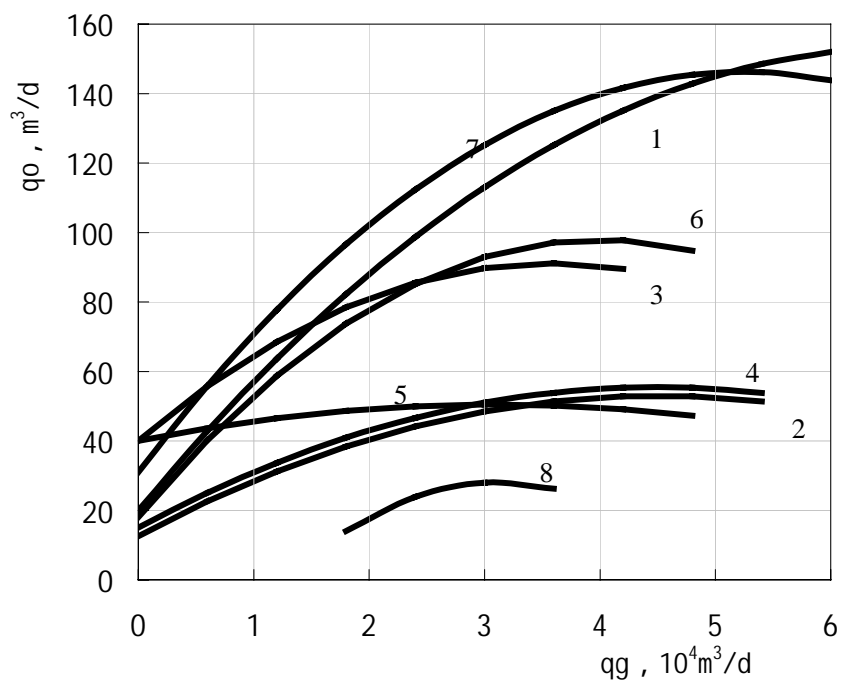


图4 B井组各井特性曲线(图中的数值指井号)

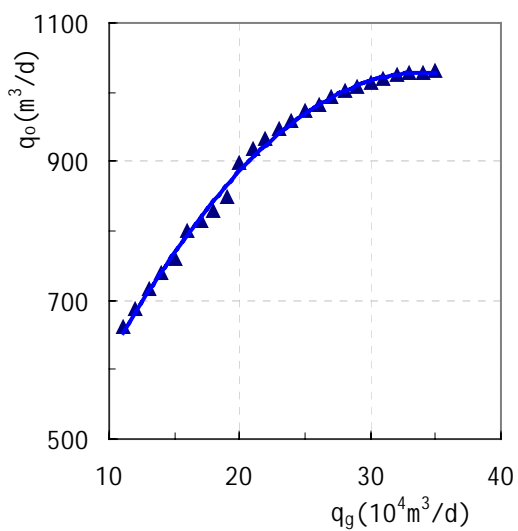


图5 A区块特性曲线

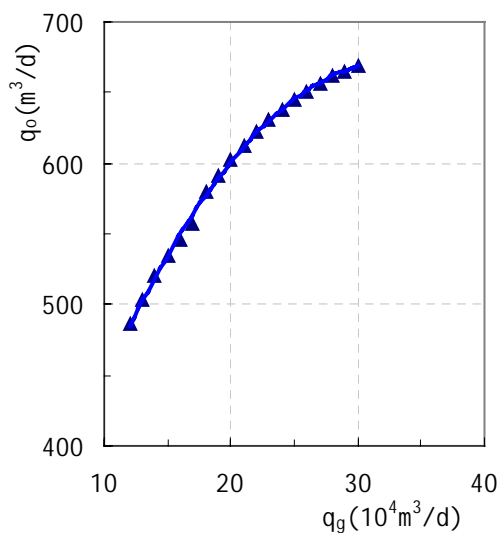


图6 B区块特性曲线

## **an Approach for Optimization of Gas Allocation to a Group of Wells and Oilfield in Artificial Lift**

Haiquan Zhong<sup>1</sup> Yingchuan Li<sup>2</sup> Yonghui Liu<sup>1</sup>

(1 Southwest Petroleum Institute , Chengdu Szechwan 610500 ; 2 “National Key Laboratory for Oil/Gas Reservoir Geology Exploitation Engineering” Southwest Petroleum Institute)

### **Abstract**

The paper summarizes the current status of the optimization of gas allocation to a group of wells, and analyzes the characteristics of all types of the gas-lift performance curves. Considering the practicability to fields and the rationality, the paper fits the scattered points ahead of maximum value in the gas lift performance curve as quadratic equation. The well group performance curve is defined as the relationship between the gas injection rate and the maximum oil production rate. The paper consummates the well group optimization model of gas allocation and develops the oilfield (with n well groups) optimization model of gas allocation, and gives a new method as well penalty function to solve the non-linear optimization model of gas allocation. To improve the rate of solving the model, a new approach named maximum gas allocation is proposed to guess the initial gas injection rates. The penalty function is capable of accommodating both the equality constraints and inequality constraints. As a rule, the convergence rate is affected only by an initial guess for the gas injection rates. By using the new method which the paper puts forward, well groups and oilfield gas allocation model is solved and the optimal gas allocatin results of well group A and B were provided in the end.

**Keywords:** *optimization gas allocation, performance curve, mathematical model, non-linear constraint, discipline function*