

文章编号: 0253-2697(2010)03-0475-05

# 抽油机井区块整体节能参数仿真优化方法

董世民<sup>1</sup> 张喜顺<sup>1</sup> 吴长杰<sup>1</sup> 郭吉民<sup>2</sup>

(1. 燕山大学机械工程学院 河北秦皇岛 066004; 2. 华北油田采油工艺研究院 河北任丘 062552)

**摘要:** 应用多相流理论计算了抽油泵的沉没压力和排出压力, 改进了抽油杆柱轴向振动底部边界条件的仿真模型, 完善了抽油机井有效功率、电动机输入功率与抽油系统效率的仿真模型。以抽油系统输入功率最低为优化设计的目标函数, 优化了单井不同产量条件下的最佳抽汲参数及所对应的最低输入功率, 建立了单井最低输入功率与产量之间的回归模型。以该模型为基础, 将单井产量作为优化设计变量, 考虑区块整体的原油计划产量约束, 建立了以区块整体输入功率最低为目标的区块整体优化设计模型。综合单井与区块整体的优化设计结果, 优选出整体区块内各个单井的最佳产量以及所对应的最佳抽汲参数。计算实例表明, 与单井优化设计结果比较, 利用区块整体优化方法可以进一步降低区块整体的总耗电量。实际算例表明, 采用区块整体优化抽油系统的方法, 输入功率可以减少 16.7%。

**关键词:** 抽油机井; 整体区块; 最低能耗; 抽汲参数; 优化设计; 仿真模型

中图分类号: TE833

文献标识码: A

## Simulation and optimization method for the integral energy-saving suction parameters of rod pumping wells in an oilfield

DONG Shimin<sup>1</sup> ZHANG Xishun<sup>1</sup> WU Changjie<sup>1</sup> GUO Jimin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Oil Production Technology Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** The submergence and the discharge pressure of oil well pump were calculated on the basis of the multiphase flow theory. The bottom boundary conditions of the axial vibration of rod string were improved, the simulating models for the effective power, the input power of motors and the system efficiency were perfected. Taking the least input power of suction system as the objective function of optimization design, the suction parameters were optimized under the condition of different output yield of single oil well, and the regression models were set up for describing the relationship between the least input power and the output of single well. The output of single well was taken as the variable of optimization design, and the integral energy-saving optimization model in an oilfield was established in consideration of the restraint condition. By synthesizing the optimization design results of single well and the integral optimization design results, the optimal output and suction parameters of all wells in an oilfield can be obtained. The actual optimizing examples showed that the total power consumption of all wells in an oilfield was less by 16.7% using the parameters designed by the integral optimization method than that using the parameters designed by the single optimization method.

**Key words:** pumping well; overall oilfield; least energy consumption; suction parameters; optimization design; simulation model

大量研究结果表明, 优化抽汲参数是提高抽油机井系统效率的有效途径<sup>[1-2]</sup>。国内外学者在抽油机井参数优化设计方面做了大量的研究工作<sup>[3-6]</sup>。文献[3]所介绍的方法是以给定的产量为约束, 以能耗最低为优化设计的目标函数; 文献[4-6]所介绍的方法是以给定的产量为约束或不考虑产量约束, 以系统效率最高为优化设计的目标函数。实质上, 上述两类优化方法的目标函数是一致的, 因为在油井产量一定条件下, 能耗最低也为系统效率最高。综合上述研究成果可以看出, 目前抽油机井参数的优化设计都是以单井为研

究对象。实际上, 抽油机井生产的最根本任务是生产原油。我国油田目前的实际生产状态是整个油田或区块应实现计划原油产量。由于各井供液能力和含水率的差异, 导致以单井系统效率最高为目标的系统优化设计结果, 不一定能确保实现计划原油产量时整个油田或区块的能耗最低。

针对油田的实际生产情况以及目前参数优化设计方法所存在的不足, 笔者提出了一种以整体区块能耗最低为目标的抽油机节能仿真优化设计方法, 即同时将区块内所有油井作为研究对象, 在保证完成整个油

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50974108)资助。

作者简介: 董世民, 男, 1962年9月生, 1998年获西南石油学院博士学位, 现为燕山大学机械工程学院教授, 主要从事机械采油系统动态仿真与运行优化的科研工作。E-mail: ysudshmi@163.com



田或区块计划原油产量的前提下,整体优化出所有油井的最佳抽汲参数以及所对应的最佳产量和最佳流压。

## 1 系统输入功率与系统效率仿真模型

以抽油杆柱动态仿真为基础的抽油机井系统效率仿真模型<sup>[4-6]</sup>具有较高的仿真精度,该模型的特点是能综合考虑抽油设备的动力特性与泵实际工作状态对系统效率的影响。

### 1.1 系统有效功率仿真模型

抽油机井井筒为油气水多相流动,应用多相流能量平衡方程,可得有效功率的仿真模型为<sup>[7]</sup>

$$P_e = 10^{-3} \left\{ (p_d - p_s)Q + p_s Q_{gs} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中:  $P_e$  为有效功率, kW;  $p_s$  为泵吸入口沉没压力, Pa;  $p_d$  为泵排出口排出压力, Pa;  $k$  为天然气多变过程指数;  $Q$  为液相平均流量(以下简称实际产液量),  $m^3/s$ ;  $Q_{gs}$  为泵吸入口气相平均流量,  $m^3/s$ 。

沉没压力  $p_s$ 、排出压力  $p_d$  与实际产液量  $Q$  是有效功率仿真的基础,也是影响抽油杆柱动态、系统输入功率仿真精度的关键参数。

#### 1.1.1 沉没压力仿真模型

根据油套环空流体的物性分布特点,沉没压力由3部分组成:井口套压、气柱段压差和油柱段压差。沉没压力由下式计算<sup>[8]</sup>

$$p_s = p_c + \int_0^{H_d} \rho_g g dh + \int_{H_d}^L \rho_{og} g dh \quad (2)$$

式中:  $p_c$  为井口套压, Pa;  $L$  为下泵深度, m;  $H_d$  为动液面高度, m;  $\rho_g$  为气柱密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_{og}$  为溶气原油密度,  $kg/m^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

#### 1.1.2 排出压力与实际产量的耦合仿真模型

应用 Orkiszewski 法建立油管内压力分布规律的仿真模型为<sup>[9]</sup>

$$\frac{dp}{dh} = -(\rho_m g + \tau_l) \cdot \left( 1 - \frac{W_l q_g}{A_l^2 p} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中:  $p$  为压力, Pa;  $h$  为深度, m;  $\rho_m$  为油气水混合物密度,  $kg/m^3$ ;  $\tau_l$  为摩阻损失梯度, Pa/m;  $A_l$  为油管过流面积,  $m^2$ ;  $W_l$  为流体总质量流量,  $kg/s$ ;  $q_g$  为气体体积流量,  $m^3/s$ 。

混合物密度和摩阻损失梯度的计算模型取决于流动型态,即取决于油井实际产液量。当已知油井实际产液量时,可以直接利用式(3)求得排出压力;对于系统仿真和优化设计,由于油井实际产液量是待求量,因此须首先计算油井实际产量,才能利用该式计算

排出压力。

油井实际产液量由下式计算<sup>[10]</sup>

$$Q = 1440 \times \frac{\pi}{4} D^2 S n (\eta_s \eta_F \eta_L \eta_V) \quad (4)$$

式中:  $D$  为泵柱塞直径, m;  $S$  为悬点冲程长度, m;  $n$  为悬点冲数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $\eta_s$  为柱塞有效冲程系数;  $\eta_F$  为充满系数;  $\eta_L$  为漏失系数;  $\eta_V$  为沉没压力条件下溶气原油的体积系数。

由式(3)和式(4)可以看出,产液量  $Q$  和排出压力  $p_d$  相互影响,式(3)和式(4)是一耦合的数学模型。式(3)反应了油井产液量随泵排出压力的变化规律,称之为泵流出特性曲线;式(4)反应了流体在油管内流动时,泵排出压力随油井产量的变化规律,称为管路特性曲线。泵流出特性曲线和管路特性曲线的交点即为系统的稳定工况点。求解上述耦合方程组,可以确定稳定工况点的排出压力和油井实际产液量。

### 1.2 悬点示功图仿真模型

悬点示功图仿真模型由描述抽油杆柱轴向振动的波动方程、悬点运动位移边界条件与柱塞液体载荷边界条件所组成<sup>[10]</sup>。柱塞液体载荷是影响悬点示功图仿真精度的主要因素。当考虑泵阀水力损失和柱塞摩擦力的影响时,柱塞液体载荷  $N_p(t)$  为

$$N_p(t) = A_p(p_d - p) - A_{nd} p_d + F_f \quad (5)$$

式中:  $A_p$  为柱塞横截面积,  $m^2$ ;  $A_{nd}$  为底部抽油杆的横截面积,  $m^2$ ;  $p$  为任意时刻泵筒内液体压力, Pa;  $F_f$  为柱塞与泵筒之间的摩擦力, N。

(1) 柱塞下冲程,游动阀打开之前:根据气体多变压缩过程,得到泵筒内液体压力的计算公式为

$$p = \left[ \frac{V_g}{V_g - (V_p - V_x)} \right]^k (p_s - \Delta p_s) \quad (6)$$

式中:  $V_x$  为柱塞行程容积,  $m^3$ ;  $V_p$  为抽油泵柱塞有效行程容积,  $m^3$ ;  $V_g$  为柱塞在上死点时泵筒内自由气的体积,  $m^3$ ;  $\Delta p_s$  为吸入阀的水力损失, Pa。

游动阀打开瞬间,柱塞行程容积为  $V_d$ ,此时泵筒内流体压力为  $p_d + \Delta p_d$ 。行程容积  $V_d$  满足如下关系:

$$V_g - (V_p - V_d) = V_g \left( \frac{p_s - \Delta p_s}{p_d + \Delta p_d} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

(2) 柱塞下冲程,游动阀打开之后:泵筒内液体压力为常数  $p_d + \Delta p_d$ 。

(3) 柱塞上冲程,固定阀打开之前:根据气体多变膨胀过程,得到泵筒内液体压力的计算公式为

$$p = \left( \frac{V_{og}}{V_{og} + V_x} \right)^k (p_d + \Delta p_d) \quad (8)$$

式中:  $V_{og}$  为柱塞到达下死点时余隙容积内残留气体的体积,  $m^3$ 。



固定阀打开瞬时,柱塞行程容积为  $V_s$ ,此时泵筒内流体压力为  $p_s - \Delta p_s$ 。行程容积  $V_s$  满足如下关系

$$V_{0g} + V_s = V_{0g} \left( \frac{p_s - \Delta p_s}{p_d + \Delta p_d} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (9)$$

(4) 柱塞上冲程,固定阀打开之后:泵筒内液体压力为常数  $p_s - \Delta p_s$ 。

以悬点载荷的仿真结果为基础,可以建立曲柄轴净扭矩、电动机输入功率和系统效率的仿真模型<sup>[10]</sup>。

## 2 单井不同产量最低能耗的仿真与回归模型

对于单井任意给定的产量  $Q$ ,以系统输入功率最低为目标函数,优选抽汲参数与杆柱组合,可得该井不同产量时的最低系统输入功率及所对应的最佳抽汲参数。

### 2.1 单井不同产量时最低能耗的仿真优化模型

#### 2.1.1 设计变量

将冲程  $S$ 、冲数  $n$ 、泵径  $D$ 、泵深  $L$  和抽油杆柱组合(第  $i$  级抽油杆直径为  $d_i$ ,长度为  $L_i$ ,  $i=1,2,\dots,I$ ,  $m$  为杆柱级数)作为设计变量,即

$$\mathbf{X} = \{S, n, D, L, (d_i, L_i : i = 1, 2, \dots, I)\} \quad (10)$$

#### 2.1.2 目标函数

当油井设备类型与管理状态一定时,系统输入功率只是抽汲参数的函数<sup>[6]</sup>。以系统输入功率最低为目标,参数优化设计的目标函数可以表示为

$$\min F[S, n, D, L, (d_i, L_i : i = 1, 2, \dots, I)] \quad (11)$$

#### 2.1.3 约束条件

在优化单井抽汲参数时,给定油井产量,并综合考虑悬点最大载荷利用率、曲柄最大扭矩利用率、电动机功率利用率、抽油杆柱强度与等强度等约束条件<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.4 单井仿真优化数学模型

目标函数和约束条件构成了单井参数优化设计的数学模型,应用优化算法可以求得单井不同产液量时的最低输入功率及所对应的抽汲参数。

### 2.2 单井最低能耗和产液量的回归模型

根据单井不同产量时系统最低输入功率的仿真优化结果,可建立系统最低输入功率与产液量之间的回归模型

$$P_j = a_{0j} + a_{1j}(Q_j - Z_j) + a_{2j}(Q_j - Z_j)^2 + a_{3j}(Q_j - Z_j)^3 \quad (12)$$

式中: $P_j$  为第  $j$  口井在产量  $Q_j$  时的最低输入功率;

$a_{0j}$ 、 $a_{1j}$ 、 $a_{2j}$ 、 $a_{3j}$  和  $Z_j$  均为第  $j$  口井的回归系数。

## 3 区块整体能耗最低系统优化模型

在保证区块实现计划产油量的前提下,以区块整体能耗最低为目标,优选每口井的最佳产液量和最佳产液量所对应的抽汲参数,从而实现以区块整体能耗最低为目标的参数优化设计。

### 3.1 设计变量

将油井的产液量作为设计变量,即

$$\mathbf{X} = \{Q_j, j = 1, 2, \dots, J\} \quad (13)$$

式中: $J$  为区块内油井数量。

### 3.2 目标函数

将整体区块系统输入功率最低作为产液量与抽汲参数优化设计的目标函数,即

$$\min F(\mathbf{X}) = \min \sum_{j=1}^J \{a_{0j} + a_{1j}(Q_j - Z_j) + a_{2j}(Q_j - Z_j)^2 + a_{3j}(Q_j - Z_j)^3\} \quad (14)$$

### 3.3 约束条件

区块整体产油量等于区块计划产油量,即

$$\sum_{j=1}^J Q_j(1 - n_{wj}) - Q_0 = 0 \quad (15)$$

式中: $n_{wj}$  为第  $j$  口井的含水率; $Q_0$  为整个区块计划产油量, t/d。

### 3.4 优化数学模型

根据上述目标函数和约束条件,可得产液量和抽汲参数优化设计的一般数学模型为

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^J \{a_{0j} + a_{1j}(Q_j - Z_j) + a_{2j}(Q_j - Z_j)^2 + a_{3j}(Q_j - Z_j)^3\} \\ \sum_{j=1}^J Q_j(1 - n_{wj}) - Q_0 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

应用惩罚函数优化算法求解上述极值问题,可以求得单井最优产液量。

## 4 设计实例

在笔者开发的《抽油机井高效运行计算机仿真优化设计系统》计算机软件的基础上<sup>[6,10]</sup>,进一步完善了单井仿真优化设计功能,并增加了单井最低能耗与产液量的回归分析、区块整体仿真优化功能。应用该软件系统,对某油田 7 口抽油机井的抽汲参数进行了整体优化设计。表 1 列出了 7 口油井优化前的参数。

#### 4.1 单井不同产量时最低能耗仿真优化实例

对单井不同产量时的系统最低输入功率以及抽汲参数进行优化设计。图1绘出了某口油井系统最低输入功率随产液量的变化规律。

在保证各单井产液量不变的条件下,分别优化表1中各油井的抽汲参数,单井最低能耗优化结果见表2。

在保证区块7口油井总产油量不变的条件下,对区块进行整体优化设计,整体区块最低能耗优化结果见表3。

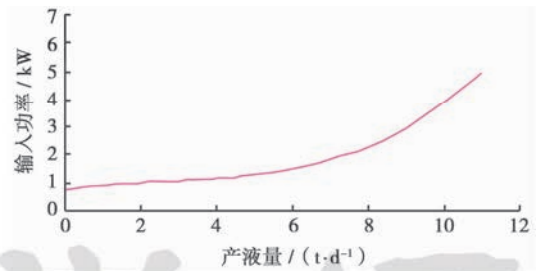


图1 最低能耗与产液量关系曲线

Fig. 1 Relation of the least energy consumption with liquid output

表1 某区块7口油井优化前抽汲参数

Table 1 The suction parameters of seven wells in an oilfield before optimization

井号	冲程/m	冲数/min <sup>-1</sup>	泵径/mm	泵深/m	动液面/m	含水率/%	产液量/(t·d <sup>-1</sup> )	产油量/(t·d <sup>-1</sup> )	输入功率/kW	系统效率/%
1	2.53	5.17	38	1205.38	1109	7.1	9.60	8.92	4.01	30.23
2	2.46	4.53	38	1374.79	1015	80.0	13.90	2.78	6.49	27.09
3	2.38	5.95	38	1226.31	1158	6.4	10.42	9.75	5.55	26.19
4	2.52	4.48	44	1273.17	1190	6.8	6.58	6.13	4.20	27.69
5	2.50	3.32	38	1356.40	636	6.4	10.88	10.18	3.22	28.76
6	2.50	5.31	32	1360.99	689	75.0	13.85	3.46	4.39	30.86
7	2.46	4.17	38	1296.38	922	50.0	10.36	5.18	4.79	27.44
合计(平均值)							75.59	46.57	32.65	(28.32)

表2 7口油井单独优化后的抽汲参数

Table 2 The suction parameters of seven wells by the single optimization method

井号	冲程/m	冲数/min <sup>-1</sup>	泵径/mm	泵深/m	动液面/m	含水率/%	产液量/(t·d <sup>-1</sup> )	产油量/(t·d <sup>-1</sup> )	输入功率/kW	系统效率/%
1	2.5	5.65	32	900	764.1	7.1	9.60	8.92	2.76	35.40
2	3.0	4.28	32	1000	698.6	80.0	13.90	2.78	3.69	34.55
3	2.5	3.00	44	1378	1227	6.4	10.42	9.75	4.24	35.20
4	2.5	3.60	32	1026	845.4	6.8	6.58	6.13	2.31	34.53
5	1.8	2.79	56	1200	709.5	6.4	10.88	10.18	2.95	35.53
6	2.5	3.00	44	1060	707.9	75.0	13.85	3.46	3.62	35.58
7	2.5	2.89	38	900	585.5	50.0	10.36	5.18	2.95	32.28
合计(平均值)							75.59	46.57	22.52	(34.72)

表3 7口油井整体优化后的抽汲参数

Table 3 The suction parameters of seven wells by the integral optimization method

井号	冲程/m	冲数/min <sup>-1</sup>	泵径/mm	泵深/m	动液面/m	含水率/%	产液量/(t·d <sup>-1</sup> )	产油量/(t·d <sup>-1</sup> )	输入功率/kW	系统效率/%
1	2.5	4.42	32	900	696.4	7.1	9.40	8.73	2.44	33.92
2	2.0	3.78	32	1378	229.8	80.0	8.14	1.63	2.13	23.29
3	3.0	4.44	32	1000	798.9	6.4	10.38	9.72	3.09	36.68
4	2.5	4.40	32	900	770.6	6.8	6.60	6.15	2.27	33.51
5	1.8	3.59	56	1102	988.6	6.4	14.67	13.73	4.13	43.29
6	1.8	4.70	28	1429	73.2	75.0	7.03	1.76	2.06	16.97
7	2.5	2.66	38	900	498.1	50.0	9.69	4.85	2.64	30.13
合计(平均值)							65.91	46.57	18.76	(31.11)

#### 4.2 优化结果对比分析

根据优化结果可以看出,7口井单独优化后,区块平均系统效率由28.32%提高到34.72%,提高了22.6%;区块系统输入功率由32.65 kW下降到

22.52 kW,节电率为31.0%。7口井整体优化后,区块平均系统效率提高到31.11%,提高了9.85%,系统效率提高幅度低于单井优化设计结果。但是,区块系统输入功率由32.65 kW下降到18.76 kW,节电率为



42.5%。和单井优化结果比较,进一步节电16.7%。

显然,和单井优化设计结果比较,整体优化的平均系统效率有所降低,但区块的总耗电量却进一步降低,节电效果更明显。这是因为两种设计方法的约束条件发生了变化。单井优化不仅约束了优化前后区块的总产液量、产油量不变,而且约束了各个单井的产液量、产油量也不变。但此时单井产液量所对应的流压不一定是最佳流压;整体优化设计仅仅约束了优化前后区块的总产油量不变,优化了单井抽汲参数和单井产液量,即优化了单井流压。整体优化设计后,区块实际产液量降低,这是系统输入功率进一步降低的根本原因。

## 5 结 论

(1) 应用多相流理论计算抽油泵的排出压力和吸入压力,并以此为基础改进了有效功率和抽油杆柱轴向振动底部边界条件的仿真模型。实际应用结果表明,应用多相流理论改进排出压力和泵负荷仿真模型,可以显著提高悬点示功图与系统输入功率的仿真精度。

(2) 以单井为优化研究对象,优选出了单井不同产液量时的系统最低输入功率,并建立了系统最低输入功率与产液量之间的回归方程。结果表明,系统最低输入功率随油井产液量呈三次方关系增加。因此,对于高含水油井,虽然经过优化设计可以显著提高系统效率,但系统输入功率的绝对数却显著增加。

(3) 与单井优化设计结果比较,整体优化的总耗电量可以进一步降低,节电效果更明显。这是由于整体优化设计强调了优化前后区块的总产油量不变,其优化结果可以降低区块的总产液量,并明显降低区块的系统输入功率。特别是在一个区块中,若不同井网、不同油井之间的含水率和产液量存在较大差异,则整体优化设计的节能效果将更显著。

(4) 进一步完善了“抽油机井高效运行计算机仿真优化设计系统”计算机软件。软件功能由单井仿真优化设计发展到区块整体仿真优化设计。大量的现场实际应用结果表明,该软件系统具有广阔的推广应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 姚春东. 提高抽油机井系统效率的计算机仿真分析[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 106-110, 114.  
Yao Chungdong. Computer simulation for enhancing system efficiency of rod pumping well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 106-110, 114.
- [2] 崔振华, 余国安, 安锦高, 等. 有杆抽油系统[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-269.  
Cui Zhenhua, Yu Guo'an, An Jingao, et al. Sucker-rod pumping system[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1-269.
- [3] 郑海金, 邓吉彬. 能耗最低机采系统设计方法的研究及应用[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 129-132.  
Zheng Haijin, Deng Jibin. Research and application on designing method of sucker-rod pumping system with the least energy consumption[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 129-132.
- [4] 董世民, 姚春冬, 齐振林. 以系统效率为目标函数优选抽油机井抽汲参数[J]. 石油学报, 1993, 14(4): 124-133.  
Dong Shimin, Yao Chungdong, Qi Zhenlin. Optimization of suction parameters of pumping wells with system efficiency as an objective function[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(4): 124-133.
- [5] 董世民, 李海琴, 闫新明, 等. 抽油机井系统效率极限值的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3533-3537.  
Dong Shimin, Li Haiqin, Yan Xinming, et al. Simulating maximum of system efficiency of rod pumping wells[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3533-3537.
- [6] 董世民, 王胜杰, 卢东风, 等. 定向井有杆抽油系统抽汲参数的优化设计和仿真模型[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 120-123.  
Dong Shimin, Wang Shengjie, Lu Dongfeng, et al. Simulation models for optimization design of suction parameters for rod pumping system in directional wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 120-123.
- [7] 董世民, 黄秀华. 游梁式抽油机井有效功率计算方法探讨[J]. 石油机械, 2001, 29(7): 39-41.  
Dong Shimin, Huang Xiuhua. Calculation method of wattful power of rod-pumped wells[J]. China Petroleum Machinery, 2001, 29(7): 39-41.
- [8] 陈家琅, 陈涛平, 魏兆胜. 抽油机井的气液两相流动[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 100-110.  
Chen Jialang, Chen Taoping, Wei Zhaosheng. Gas-liquid flow in rod pumping wells[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 100-110.
- [9] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000: 33-41.  
Zhang Qi. Fundamental and designing of petroleum engineering[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000: 33-41.
- [10] 董世民. 抽油机井动态参数的计算机仿真与系统优化[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 87-93.  
Dong Shimin. Computer simulation of dynamic parameters of rod pumping system optimization[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 87-93.

(收稿日期 2009-07-06 改回日期 2009-10-05 编辑 仇学艳)