

文章编号:1673-5005(2017)05-0123-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.05.015

基于机采和集油系统整体能耗最低的集油参数优化方法

董世民,王宏博,孙秀荣,童志雄,孙亮

(燕山大学机械工程学院,河北秦皇岛 066004)

摘要:将环状集油环上的抽油机井与集油管网作为研究对象,基于多相水平管流模型和抽油机井动态参数的仿真技术建立集油管网压降、抽油机井井口油压与集油系统掺水参数关系的仿真模型及抽油机井输入功率、油井产量与井口油压之间关系的数学模型,即抽油机井输入功率、油井产量与掺水参数之间关系的数学模型。分别以集油和机采系统总能耗最低、集油和机采系统效益最大为优化设计的目标函数,建立集油系统掺水参数优化设计的数学模型。结果表明:井口油压对抽油机井输入功率与油井产量有显著影响;掺水温度与掺水流量对集油和机采系统总能耗、总效益具有显著影响,将机采与集油系统作为整体优化可显著提高系统整体经济效益。

关键词:集油系统;机采系统;掺水参数;整体仿真;整体优化

中图分类号:TE 933 **文献标志码:**A

引用格式:董世民,王宏博,孙秀荣,等.基于机采和集油系统整体能耗最低的集油参数优化方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):123-129.

DONG Shimin, WANG Hongbo, SUN Xiurong, et al. Oil gathering parameters optimization method based on the lowest energy consumption of machine mining and oil gathering system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(5): 123-129.

Oil gathering parameters optimization method based on the lowest energy consumption of machine mining and oil gathering system

DONG Shimin, WANG Hongbo, SUN Xiurong, TONG Zhixiong, SUN Liang

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The pumping well of the annular oil collecting ring, and the oil gathering pipe network are taken to analyze. Based on the multiphase flow model in the horizontal tube, in combination with the simulation technology on the dynamic parameters of the pumping, the simulation model on the relationship among the pressure drop in the oil gathering pipe network, the wellhead pressure of the pumping well and the watered parameters in the oil gathering system is built. Then another simulation model on the relationship among the input power of pumping wells, oil production and wellhead pressure is also given. Taking the lowest energy consumption and the biggest system benefit as the objective function for optimization, a mathematical model on the watered parameters optimization in the oil gathering system is presented. The results show that the inlet oil pressure has a significant effect on the input power and well production, and the water temperature and flow have great influences on the total energy consumption and system benefit. The overall optimization on the machine mining and oil gathering system can significantly improve the overall economic benefit of the system.

Keywords: oil gathering system; machine mining system; watered parameters; overall simulation; overall optimization

机采井系统与地面集油系统是油田两大主要生产系统,两个子系统相互关联、相互影响,是一个完

整系统。机采井产出液经井口流入地面集油系统。对于地面集油系统,机采井产出液与掺水参数共同

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51174175)

作者简介:董世民(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油田生产系统节能技术与运行优化。E-mail:ysudshm@163.com。

影响集油管网内流体的流动规律、集油系统能耗以及机采井井口回压^[1-4],进而影响机采井井口油压;对于机采井系统,井口油压不仅影响油井产量,而且影响机采井能耗^[5-7]。目前在设计集油系统掺水参数时,仅以集油系统为研究对象^[8-9],未考虑集油系统掺水参数对机采井能耗的影响。笔者以单管环状集油系统为研究对象,将集油系统与集油环上抽油机井作为一个整体,考虑集油系统掺水参数对抽油机井井口油压、能耗的影响,以集油与机采系统总能耗最低为优化设计的目标函数,建立集油系统掺水参数的优化设计方法。

1 油井油压与掺水参数关系的仿真模型

在多相管流计算中,关键是确定流体的流动型态。对于油气水三相管流,目前一般将油气水三相流处理为气液两相流^[10-14]。根据油田各区块的实际情况,选择适应于该区块特点的多相流计算公式,应用最优化技术,根据现场实际工况对公式中影响显著的参数进行修正,从而提高三相流压降模型计算的准确性。气液两相流型态主要包括分层流、过渡流、间歇流(包括气团流与段塞流)和分散流(包括气泡流和雾散流)。根据无滑脱率 E_1 、弗鲁德数 N_{Fr} 判别流动型态^[13-14]:

- (1) 当 $E_1 < 0.01$, $N_{Fr} < L_1$ 时,或 $E_1 \geq 0.01$, $N_{Fr} < L_2$ 时,为分层流;
- (2) 当 $E_1 \geq 0.01$, $L_2 < N_{Fr} \leq L_3$ 时,为过渡流;
- (3) 当 $0.01 \leq E_1 < 0.4$, $L_3 < N_{Fr} < L_1$ 时,或 $E_1 \geq 0.4$, $L_3 < N_{Fr} < L_4$ 时,为间歇流(气团流、段塞流);
- (4) 当 $E_1 < 0.4$, $N_{Fr} \geq L_1$ 时,或 $E_1 \geq 0.4$, $N_{Fr} > L_4$ 时,为分散流(气泡流、雾散流)。

无滑脱率 E_1 、弗鲁德数 N_{Fr} 以及边界值 L_1 、 L_2 、 L_3 与 L_4 的计算方法见文献[13]。

对于环状集油管网,由于受油井产出液的影响,各段管线内流体的流量与物性参数不同,须根据流型判断条件选择不同的流型计算各段管线的压力损失。图1为一个集油环上 N 口油井的压降计算模型示意图。图中各参数含义为: Q_i 为第 i 口油井产量, m^3/s ; n_{wi} 为第 i 口油井产出液的含水率,%; δ_i 为第 i 口油井天然气相对密度; ρ_i 为第 i 口油井原油密度, kg/m^3 ; T_i 为第 i 口油井产出液井口温度, $^{\circ}C$; g_i 为第 i 段管线内流体流量, m^3/s ; Δp_i 为第 i 段管线内流体流动的压力损失,Pa; p_i 为第 i 口油井井口压力(井口油压),Pa。

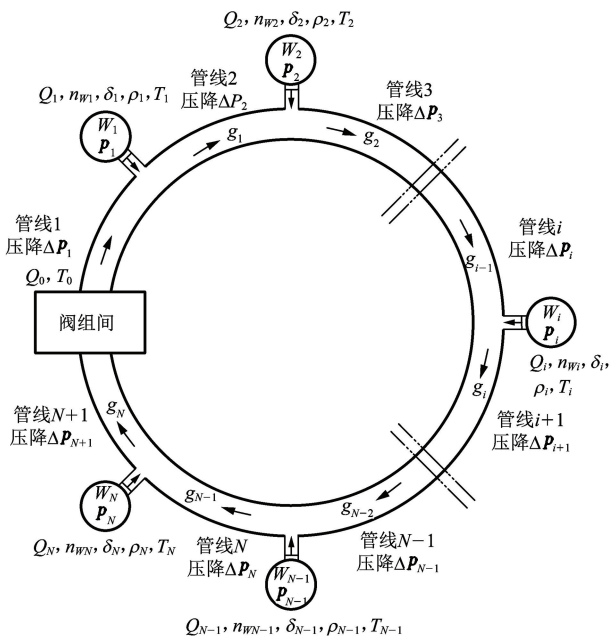


图1 集油环压降模型示意图

Fig. 1 Pressure loss model in annular oil gathering pipe

对于水平集输管网,在油气水三相混输管道中,忽略重力压力梯度,则总压力梯度包括摩阻压力梯度和加速度压力梯度,表示为

$$-\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_f + \left(\frac{dp}{dl} \right)_a \quad (1)$$

式(1)的具体表达式为

$$\frac{dp}{dl} = \lambda \frac{\rho}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \left(1 - \frac{QQ_g \rho}{A^2 p} \right) \quad (2)$$

式中, p 为 dl 管段内流动介质的绝对压力,Pa; λ 为两相混输摩阻系数; ρ 为油气水三相密度, kg/m^3 ; v 为气液混合速度, m/s ; A 为管段过流面积, m^2 ; D 为管段直径, m ; Q 为三相总流量, m^3/s ; Q_g 为气相总流量, m^3/s 。

计算压降时须确定持液率 H_l 和水力摩阻系数 λ ,不同流型的 H_l 和 λ 计算方法不同,可以参考文献[13]、[14]给出的方法进行计算。

如图1所示,定义集油环介质流量向量 G 和节点流量向量 Q 分别为

$$G = (g_1, g_2, \dots, g_n, g_{N+1})^T, \quad (3)$$

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T. \quad (4)$$

管道 i 内的介质流量为

$$g_i = \sum_{k=1}^{i-1} q_k + Q_0, \quad i = 1, 2, \dots, N, N+1. \quad (5)$$

式中, Q_0 为阀组间的掺水量, m^3/s ; q_i 为第 i 口井的产液量, m^3/s 。

温度是集油管网水力参数中的关键因素,管道 j

的起点温度 t_j 递推公式为

$$t_j = \frac{\sum_{k=1}^{j-1} g_k c_k t_k + g_j (1 - n_{wj}) c_{oj} T_{oj} + g_j n_{wj} c_{wj} T_{oj}}{q_j c_j},$$
$$j = 1, 2, \dots, N, N + 1. \tag{6}$$

式中, c_{oj} 和 c_{wj} 分别为第 i 口油井油和水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; c_k 为第 k 口油井混合液的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; c_j 为第 j 段管道内混合液的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; n_{wj} 为第 j 口油井中的含水率; T_{oj} 为第 i 口油井中的原油温度, $^\circ\text{C}$; q_j 为第 j 段管道内的介质流量, kg/s 。

两相混输的水力摩阻系数 λ 计算式为

$$\lambda = \lambda_0 e^n. \tag{7}$$

式中, λ 为两相流水力摩阻系数; λ_0 为均质流水力摩阻系数; n 为指数。

对于油气水三相流的水力摩阻系数,修正式为

$$\lambda = \alpha \lambda_0 e^s + \beta. \tag{8}$$

式中, α, β 为修正系数。

基于最小二乘法原理逼近修正系数 α, β ,

$$\min F(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{N+1} (\Delta p_0 - \Delta p(\alpha, \beta))^2. \tag{9}$$

式中, Δp_0 和 $\Delta p(\alpha, \beta)$ 分别为给定的实测压差和理论压差。

该优化问题属于无约束非线性优化问题,可以采用文献[15]中的优化方法进行求解。

由压降模型计算集油环上各节点压力,则集油环上第 k 口油井油压的计算模型为

$$p_k = \sum_{k=k+1}^{N+1} \Delta p_k + p_h. \tag{10}$$

式中, p_h 为掺水环回液压力, Pa ; n 为集油环上的油井数; Δp_k 为第 k 段管路的压降, Pa 。

井口油压随掺水量、掺水温度的回归模型为

$$p_{k,ij} = a_1 + a_2 Q_i + a_3 T_j + a_4 Q_i^2 + 2a_5 Q_i T_j + a_6 T_j^2. \tag{11}$$

式中, $p_{k,ij}$ 为集油环上第 k 口油井油压, Pa ; Q_i 为集油环上不同的掺水量, m^3/s ; T_j 为集油环上不同的掺水温度, $^\circ\text{C}$ 。

利用上述模型,计算某集油环 3 口油井的井口油压。计算参数:原油密度为 $860 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、原油黏度为 $40 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、气油比为 $17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、天然气相对密度为 0.8、井口回油温度为 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 、掺水量为 $2.2 \text{ t}/\text{h}$ 、掺水温度为 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 、掺水回油压力为 0.35 MPa 、掺水管线长度为 2430 m 、掺水管管径为 54 mm 。油井产液量、含水率、不同流型条件下井口油压的仿真结果以及实测结果见表 1。由于集油环上油井的产液量较低、气油比较小,流型均为气泡流。井口油压仿真结果与实测结果相近,具有较高的仿真精度。

表 1 井口油压仿真结果与实测结果对比

Table 1 Comparison on simulation results and measured results of wellhead oil pressure

产液量/ ($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	含水率/ %	流型判断	井口压力仿真结果/ MPa				井口实测压 力/ MPa
			气泡流	段塞流	过渡流	水力层流	
1.5	71.4	气泡流	0.79	0.73	0.68	0.66	0.81
1.6	76.9	气泡流	0.67	0.49	0.55	0.62	0.60
0.9	86.2	气泡流	0.58	0.41	0.48	0.57	0.58

2 油压对油井能耗与产量影响的仿真评价

在抽油设备、井身结构、油井参数、抽汲参数一定的条件下,油井油压影响抽油泵的排出压力,进而影响抽油泵的产液量^[16]。通过仿真计算不同油压下的电动机输入功率、油井产液量,可得输入功率、油井产液量与油井油压的回归模型分别为

$$N_M = b_0 + b_1 p_k + b_2 p_k^2 + b_3 p_k^3, \tag{12}$$

$$Q_C = c_0 + c_1 p_k + c_2 p_k^2 + c_3 p_k^3. \tag{13}$$

式中, Q_C 为油井产液量, t/d ; N_M 为电动机输入功率, kW ; p_k 为井口油压, MPa ; c_0, c_1, c_2, c_3 为回归系数; b_0, b_1, b_2, b_3 为回归系数。

以一个集油环上的某口油井为例,已知电动机

型号 Y225S-8,额定功率为 18.5 kW 。油层中深为 1500 m 、井口油压为 0.5 MPa 、下泵深度为 1300 m 、动液面为 1250 m 、冲程为 3.2 m 、冲次为 $5/\text{min}$ 、泵径为 38 mm 。表 2 为在不同油压下电动机输入功率和产液量的仿真结果,图 2 给出了电动机输入功率、油井产液量随井口油压的变化规律。

表 2 不同油压时电机输入功率与油井产液量仿真结果

Table 2 Simulation results of motor input power and oil well liquid production under different oil pressures

序号	油压/ MPa	输入功率/ kW	产液量/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)
1	0.2	3.70	1.22
2	0.4	3.73	1.20
3	0.6	3.81	1.18
4	0.8	3.86	1.16
5	1.0	3.95	1.15

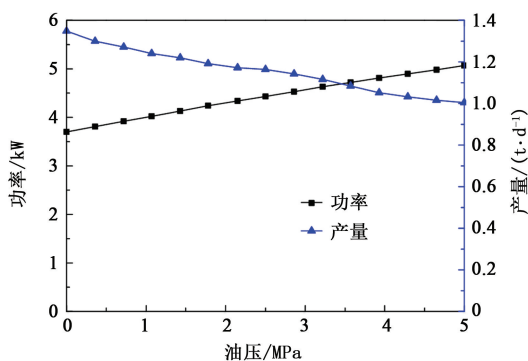


图2 电机输入功率与油井产量随油压的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of motor input power and oil well production with oil pressure

3 机采与集油系统整体仿真优化

将一个集油环的集油管网与集油环上的多口抽油机井作为一个整体系统,建立系统整体能耗与集油系统掺水参数之间的函数关系,进而建立集油系统掺水参数的优化设计方法。

3.1 机采与集油系统总能耗与能耗费用仿真模型

机采和集油系统总功率为集油环上电动机输入总功率 N_w 、集油环的水力功率 N_c 和热力功率 N_h 之和,表示为

$$N_z = N_c + N_h + N_w. \quad (14)$$

总功率计算式为

$$N_z = \sum_{i=1}^n N_{Mi} + CQ\Delta T + p_i Q_i. \quad (15)$$

式中, N_z 为机采和集油系统总功率, kW; p_i 为不同掺水量下的掺水压力, Pa; Q_i 为不同的掺水量, m^3/s ; C 为水的比热容, 取 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; Q 为掺水质量流量, kg/s ; ΔT 为温度变化值, $^\circ\text{C}$ 。

机采和集油系统一天的耗电量费用、耗气费用总和计算公式为

$$F = \frac{8.64 \times 10^4 \left(\frac{N_c}{\eta_1} + \frac{N_w}{\eta_2} \right) F_0}{1000} + \frac{8.64 \times 10^4 N_h F_1}{E \eta_3}. \quad (16)$$

式中, F 为总费用, 元; F_0 为耗电单价, 元/(kW · h); F_1 为天然气单价, 元/ m^3 ; η_1 为集油环水力功率电能利用率; η_2 为机采系统电能利用率; η_3 为集油系统热能利用率; E 为天然气完全燃烧释放的热量, $E = 71 \text{ kJ}/\text{m}^3$ 。

3.2 机采与集油系统总效益计算模型

机采和集油系统总效益计算模型为

$$S = \sum_{i=1}^N Q_{ci} (1 - n_{wi}) a - F. \quad (17)$$

式中, S 为机采和集油系统总效益, 元; Q_{ci} 为第 i 口井的产液量, t/d ; a 为原油单价, 元/ t 。

3.3 掺水参数优化模型

3.3.1 设计变量

设计变量为 $\{X\} = \{T, Q\}$, 用于研究集油环上掺水温度 T 和掺水量 Q 两个运行参数对系统能耗和效益的影响。

3.3.2 目标函数及优化模型

建立了两种不同优化目标函数的系统优化数学模型。

(1) 以集油和机采系统的机械与热力总消耗功率最低为目标函数, 数学模型为

$$\begin{cases} \min F(T, Q) = \{N_c + N_h + N_w\}, \\ g(1) \geq T_{\min}, \\ H(1) = p_h. \end{cases} \quad (18)$$

式中, $F(T, Q)$ 为掺水温度 T 、掺水流量 Q 时集油和机采系统的机械与热力总消耗功率; $g(1)$ 为回液温度不低于许用温度的不等式约束条件; $H(1)$ 为回液压力等于给定值的等式约束条件。

根据现场实际经验, 取回液温度 $T_{\min}$ 不低于 37°C , 回液压力 p_h 为 0.25 MPa 。

(2) 以集油和机采系统效益最大为目标函数, 系统优化的数学模型为

$$\begin{cases} \max F(T, Q) = \sum_{i=1}^N Q_{ci} (1 - n_{wi}) a - F, \\ g(1) \geq T_{\min}, \\ H(1) = p_h. \end{cases} \quad (19)$$

式中, $F(T, Q)$ 为掺水温度 T 、掺水流量 Q 时集油和机采系统的总效益。

3.3.3 优化算法及优化结果

上述数学模型优化问题为两变量、有约束的优化问题, 采用枚举法求解。计算不同掺水量 Q 和掺水温度 T 下的目标函数值, 通过比较求出满足约束条件的最优目标函数值以及最优掺水参数。

以某集油环为例优化掺水参数。表3分别给出该集油环4口油井的油井参数, 集油管网的结构参数。表4和表5分别列出了集油和机采系统总功率、系统效益在不同掺水量、掺水温度组合时的计算结果; 图3、4分别为集油和机采系统总能耗与效益随掺水量、掺水温度的变化规律。由仿真结果可见, 掺水温度、掺水量不同组合对集油和机采系统总能耗、集油和机采系统总效益具有显著影响。两种目标函数的优化结果具有一定的差别: 基于系统总功

率最低的优化结果为掺水量 1.5 t/h、掺水温度 60 ℃、系统最小功率 102.69 kW;基于系统总效益最大 的优化结果为掺水量 1.5 t/h,掺水温度 70 ℃、系统最大效益 25 670.61 元/d。

表 3 集油和机采系统参数

Table 3 Parameter of oil gathering and machine mining system

油井参数							管线结构参数		
油井 序号	产液量/ (t·d ⁻¹)	含水率/ %	气油比	天然气 相对密度	原油黏度/ (mPa·s)	原油密度/ (kg·m ⁻³)	管长/m	管径/mm	壁厚/mm
							240	60	3.0
1	1.4	70.5	17	0.7	40	860	600	60	3.0
2	1.9	16	17	0.7	40	860	450	60	3.0
3	1.1	16	17	0.7	35	860	130	60	3.0
4	1.8	12	17	0.7	40	860	1 450	60	3.0

表 4 集油和机采系统总功率计算结果

Table 4 Calculation results of total power of oil gathering and machine mining system

掺水温度/ ℃	掺水量/(t·h ⁻¹)										kW
	1.50	1.83	2.16	2.50	2.83	3.16	3.50	3.83	4.16	4.50	
40.00	69.45	77.33	85.28	93.27	101.31	109.38	117.48	125.60	133.74	141.90	
43.33	74.90	84.04	93.25	102.51	111.80	121.12	130.46	139.82	149.20	158.60	
46.66	80.41	90.81	101.29	111.81	122.36	132.94	143.53	154.15	164.79	175.43	
50.00	85.94	97.62	109.37	121.15	132.97	144.81	156.68	168.56	180.45	192.36	
53.33	91.51	104.46	117.47	130.53	143.62	156.74	169.87	183.01	196.18	209.35	
56.66	97.09	111.31	125.61	139.94	154.31	168.70	183.10	197.52	211.95	226.40	
60.00	102.69	118.19	133.76	149.38	165.02	180.69	196.37	212.07	227.78	243.50	
63.33	108.30	125.09	141.05	158.84	175.77	192.72	209.68	226.65	243.64	260.64	
66.66	113.93	132.01	150.15	168.33	186.54	204.77	223.02	241.27	259.54	277.82	
70.00	119.57	138.94	158.37	177.84	197.34	216.85	236.38	255.92	276.20	295.99	

表 5 集油和机采系统效益计算结果

Table 5 Calculation results of benefits of oil gathering and machine mining system

掺水温度/ ℃	掺水量/(t·h ⁻¹)										元
	1.50	1.83	2.16	2.50	2.83	3.16	3.50	3.83	4.16	4.50	
40.00	24 153.07	24 182.38	24 147.06	24 072.93	23 973.79	23 857.65	23 729.41	23 592.30	23 448.46	23 299.41	
43.33	24 436.70	24 467.03	24 433.70	24 362.54	24 267.20	24 155.51	24 032.24	23 900.48	23 762.29	23 619.12	
46.66	24 682.90	24 710.53	24 676.06	24 605.09	24 510.97	24 401.27	24 280.16	24 151.92	24 017.18	23 877.74	
50.00	24 895.85	24 917.92	24 879.91	24 806.94	24 711.95	24 602.25	24 482.24	24 354.71	24 221.51	24 083.94	
53.33	25 079.48	25 093.87	25 050.49	24 973.81	24 876.33	24 765.03	24 644.08	24 516.12	24 382.90	24 245.63	
56.66	25 237.39	25 242.53	25 192.42	25 110.75	25 009.52	24 895.34	24 772.19	24 642.52	24 508.00	24 369.74	
60.00	25 372.78	25 367.53	25 309.75	25 222.14	25 116.18	24 998.15	24 871.78	24 739.39	24 602.53	24 462.23	
63.33	25 488.50	25 472.21	25 405.97	25 311.70	25 200.28	25 077.64	24 947.27	24 811.35	24 671.31	24 528.11	
66.66	25 587.05	25 559.20	25 484.08	25 382.65	25 265.22	25 137.37	25 002.39	24 862.29	24 718.41	24 571.63	
70.00	25 670.61	25 630.93	25 546.62	25 437.68	25 313.83	25 180.34	25 040.26	24 895.47	24 407.91	24 184.06	

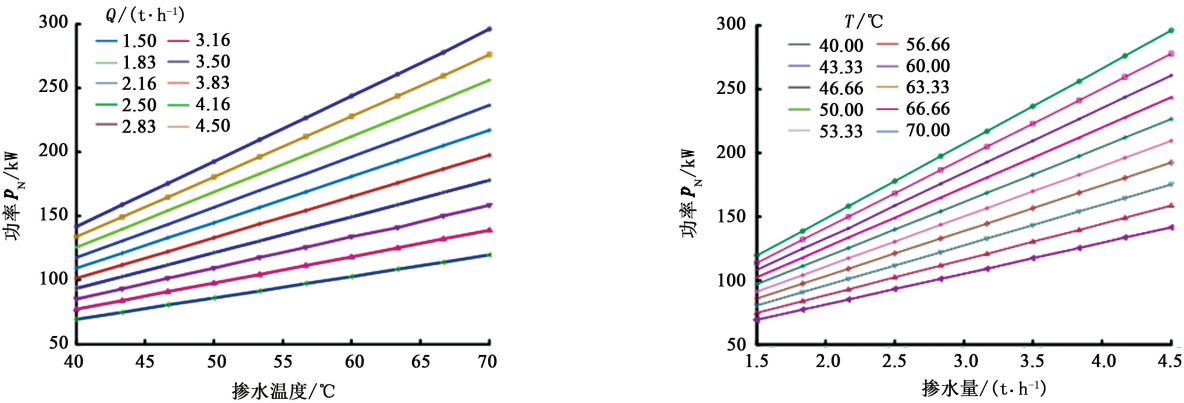


图 3 集油和机采系统总能耗随不同掺水温度和掺水量的变化曲线

Fig.3 Variation curves of total energy consumption of oil gathering and machine mining system with different water temperature and water content

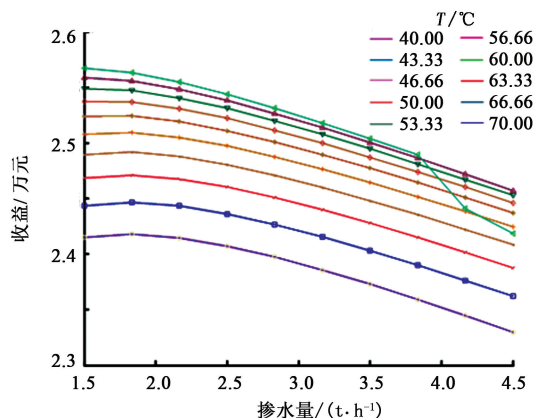
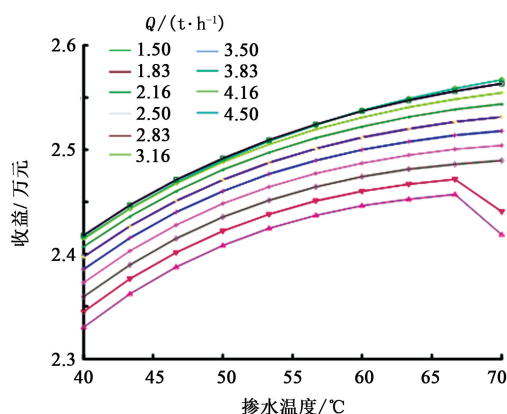


图4 集油和机采系统效益随不同掺水温度和掺水量的变化曲线

Fig.4 Variation curves of benefits of oil gathering and machine mining system with different water temperature and water content

4 结 论

(1) 机采系统作为集输系统的子系统,集油环上的节点压力和集油环上的各抽油机井油压有必然联系,利用仿真计算出集油环上节点压力对应的井口油压得到了油井油压对电动机输入功率和油井产液量的影响规律。

(2) 掺水温度与掺水流量对集油和机采系统总能耗、集油和机采系统效益有显著影响,将机采系统与集油系统作为整体优化,可显著提高系统整体经济效益。

参考文献:

- [1] 曲虎,刘欣,刘静,等. 环状掺水集油系统能耗损失影响因素研究[J]. 石油化工高等学校学报,2015,28(1):55-58.
QU Hu, LIU Xin, LIU Jing, et al. The research on factors affecting the energy losses in cyclic watered oil gathering system[J]. Journal of Petrochemical University, 2015,28(1):55-58.
- [2] 朱敬华. 集油温度对原油集输管道结蜡影响分析[J]. 石油化工设备,2013,42(1):5-8.
ZHU Jinghua. Analysis of oil gathering temperature influence on wax deposition in collector pipeline[J]. Petrochemical Equipment, 2013,42(1):5-8.
- [3] 张宽慧. 掺水温度对集油系统能耗损失的影响[J]. 内蒙古石油化工,2011,22(6):74-76.
ZHANG Kuanhui. Effect of water temperature on energy consumption in oil collecting system[J]. Inter Mongolia Petroleum Chemical Industry, 2011,22(6):74-76.
- [4] 尚增辉,曲虎,刘静,等. 环状掺水集油系统温度季节性优化研究[J]. 节能技术,2015,33(1):80-83.

SHANG Zenghui, QU Hu, LIU Jing, et al. The research on temperature of cyclic watered oil gathering system in different seasons [J]. Energy Conservation Technology, 2015,33(1): 80-83.

- [5] 崔振华. 有杆抽油系统[M]. 北京:石油工业出版社, 1994:32-59.
- [6] 董世民,崔晓华. 计算抽油泵充满系数的新方法[J]. 石油机械,2002,30(1):37-39.
DONG Shimin, CUI Xiaohua. A new method of calculating the filling coefficient of oil well pumps[J]. Petroleum Machinery, 2002,30(1):37-39.
- [7] 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.
YAO Chungong. Computer simulation for enhancing system efficiency of rod pumping well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(4):106-110.
- [8] 李心凯,孙延明,胡琪,等. 掺水集油参数优化研究[J]. 石油化工应用,2013,32(5):115-117.
LI Xinkai, SUN Yanming, HU Qi, et al. The study of process parameters optimization of water-lended crude transportation [J]. Petrochemical Industry Application, 2013,32(5):115-117.
- [9] 刘扬,关晓晶. 油气集输管网系统多目标优化设计[J]. 石油规划设计,1993,4(1):26-28.
LIU Yang, GUAN Xiaojing. Multiobjective optimization of oil-gas gathering line system[J]. Petroleum Planning Engineering, 1993,4(1):26-28.
- [10] 衣华磊. 水平管油气水三相流型识别与压降计算研究[D]. 青岛:中国石油大学,2007.
YI Hualei. Flow pattern identification and pressure drop calculation on three-phase flow in a horizontal pipeline [D]. Qingdao:China University of Petroleum, 2007.
- [11] NEIMA B. The prediction of dispersed flows boundaries in liquid-liquid and gas-liquid systems[J]. Int J Multi-

phase Flow,2001,27:885-910.

[12] 陈杰,章龙江,严大凡. 油水两相流流型研究[J]. 油气田地面工程. 2000,19(1):6-9.

CHEN Jie, ZHANG Longjiang, YAN Dafan. Study to flow pattern of oil-water two-phase flow[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2000,19(1):6-9.

[13] 冯叔初. 油气集输[M]. 东营:石油大学出版社,1994.

[14] 陈家琅. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,1989.

[15] 乔俊飞,佟磊,潘广源. 基于改进蚁群算法的 Hanoi 给水管网优化设计[J]. 控制工程,2013,20(3):483-488.

QIAO Junfei,TONG Lei,PAN Guangyuan. Design of Hanoi water distribution network based on improved antcolony optimization [J]. Control Engineering of China, 2013,20(3):483-488.

[16] 董世民. 抽油机井动态参数计算机仿真与系统优化[M]. 北京:石油工业出版社,2003.

(编辑 沈玉英)