

文章编号: 1000-0747(2016)02-0275-06 DOI: 10.11698/PED.2016.02.14

油砂蒸汽辅助重力泄油汽液界面智能调控模型优选

梁光跃, 刘尚奇, 沈平平, 刘洋, 罗艳艳

(中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 国家油气科技重大专项“美洲地区超重油与油砂有效开发关键技术”(2016ZX05031-002); 中国石油集团科技重大专项“加拿大油砂高效开发关键技术研究与应用”(2011E-2508)

摘要: 为了在油砂蒸汽辅助重力泄油开发过程中, 根据不同时刻井筒沿程蒸汽腔发育状况实时调整注采温度差(Subcool), 以防止蒸汽突破并提高热量利用效率, 开展了汽液界面智能调控模型比例-积分-微分(PID)控制方程的系数优选研究。以蒸汽腔内液池为研究对象、Subcool为调控目标, 依据热量守恒和物质平衡原理建立了PID控制方程系数优选数学模型, 采用该模型和Ziegler-Nichols(Z-N)整定法优选了适用于加拿大M区块的汽液界面智能调控模型, 并通过数值模拟评价了应用效果。研究表明: 当采用比例、积分和微分系数组合时, 进一步缩短了注采温度差达到Subcool目标值的时间, 提高收敛速度和健壮性。与常规注汽相比, 模型优选方法下智能注汽显著改善了井筒沿程蒸汽腔均匀扩展程度, 提高产油量的同时降低了汽油比, 模拟结果与Z-N整定法相似, 但模型优选法简化了智能调控模型的优选过程, 更为方便快捷。图9参18

关键词: 油砂; 蒸汽辅助重力泄油; 汽液界面; 蒸汽腔; 智能调控模型; 比例-积分-微分(PID)控制方程; 系数优选

中图分类号: TE345

文献标识码: A

A new optimization method for steam-liquid level intelligent control model in oil sands steam-assisted gravity drainage (SAGD) process

LIANG Guangyue, LIU Shangqi, SHEN Pingping, LIU Yang, LUO Yanyan

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to prevent steam breakthrough and improve thermal efficiency in the process of SAGD development of oil sands by real-time adjustment on injection-production temperature difference (Subcool) according to the growth situations of steam chamber along the wellbore, a series of studies were conducted on coefficients optimization of proportional-integral-derivative (PID) control equation for the steam-liquid level intelligent control model. According to heat conservation and material balance principles, a mathematical model for determining the coefficients of PID control equation was established with the liquid pool in the steam chamber as the objective and the Subcool as the control target. The intelligent steam-liquid level control model suitable for M Block in Canada was optimized using this mathematical model, together with the Ziegler-Nichols (Z-N) tuning method. Application effects of these PID control strategies were evaluated by reservoir numerical simulation. The results show, when the combination of PID proportional, integral and derivative coefficients are used, the time scale for Subcool to evolve to the set point is minimized and the convergence speed and robustness are improved. Compared with conventional steam injection process, the intelligent steam injection based on the PID coefficient optimization method is much better in the uniform conformance of steam chambers along the wellbore, higher in oil production and lower in steam-oil ratio (SOR). Both the model optimization method and the Ziegler-Nichols tuning method are similar in simulation results. Based on the former method, however, the optimization process of the intelligent control model is simplified greatly, so it can be implemented more conveniently and rapidly.

Key words: oil sand; SAGD; steam-liquid level; steam chamber; intelligent control model; proportional-integral-derivative (PID) control function; coefficients optimization method

0 引言

油砂作为一种重要的非常规油气资源, 主要由砂粒、沥青、矿物质、黏土和水组成, 其中沥青的密度通常大于 0.98 g/cm^3 , 黏度超过 $5 \times 10^4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 流动性极差。埋深 75 m 以内的油砂可采用露天开采, 而埋深大于 75 m 的油砂储量约占加拿大总油砂储量的 80%,

多采用长井段的双水平井蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术开采^[1]。受油砂储集层非均质性、泥岩夹层、高渗通道和井筒水动力等因素影响, 井筒沿程蒸汽腔往往扩展不均匀, 难以对汽液界面进行有效调控以防止汽窜^[2-4]。为此, 国内外研究机构正致力于研制能够灵活调节流量的智能井技术^[5-9]。加拿大阿尔伯达省北部 Orion 油田率先开展了安装分段注汽阀的智能井试验,

通过打开或关闭不同井段注汽控制阀进行周期注汽,改善了井筒沿程吸汽剖面,取得了较好的经济效益^[10-11]。

针对当前应用的智能井只能依据已知油藏状况设计各分段注汽阀的注汽速度,并不能根据不同时刻井筒沿程蒸汽腔发育状况进行实时调整的缺点,Gates等提出了“将比例-积分-微分(PID)控制器与分段注汽阀耦合进行汽液界面智能调控”的思路^[12-16],其中汽液界面智能调控模型的核心问题是PID控制方程的系数优选问题,通常有两种优选方法,一种是Ziegler-Nichols(简称为Z-N)整定法^[17],费时费力;另一种是通过建立考虑特定控制机理的数学模型进行优选,方便快捷。本文采用后一种方法,以蒸汽腔内液池为研究对象、Subcool(注汽温度和产液温度差值)为调控目标,依据热量守恒和物质平衡原理,建立了PID控制方程系数优选数学模型,并通过数值模拟评价了其应用效果。

1 汽液界面智能调控原理与算法

PID控制器问世至今已有近70年历史,以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为实际工业控制中应用最广泛、最成功的一种控制方法,其基本原理是对偏差信号进行比例、积分和微分运算变换后形成的一种控制规律^[17]。

油砂SAGD开采稳定生产的关键之一是需要在生产井上方形成一定高度的汽液界面以预防蒸汽突破,提高热量利用效率。然而,现场操作中蒸汽腔内汽液界面位置不能直接监测,只能通过监测和维持注汽温度和产液温度的合理差值来近似调控,这一温度差称为Subcool^[3]。汽液界面智能调控的基本原理见图1,根据注入井沿程非均质程度,设置多个分段注汽阀,各由1个PID控制器调控。设定Subcool目标值、初始注汽压力和调整周期,通过实时监测沿程多个位置对应的注入饱和蒸汽温度 T_s 与产液温度 T_l 的差值,计

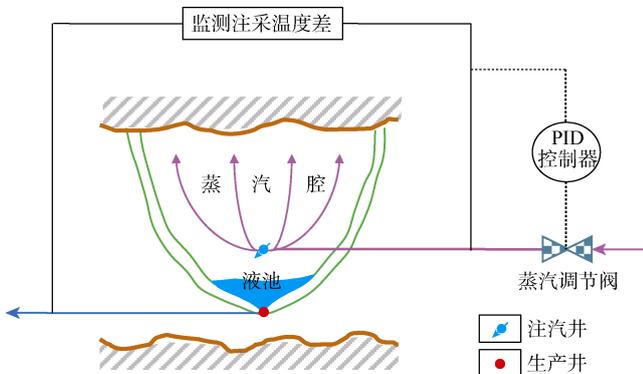


图1 SAGD蒸汽腔内汽液界面智能调控示意图

算其与Subcool目标值的偏差 $\varepsilon(t)$,并利用PID控制器控制方程(1)式计算并调整新的注汽压力,不断重复这一过程直至SAGD过程结束,以达到有效调控汽液界面的目的。

$$p_{i+1} = p_i - K_P \varepsilon_i(t) - K_I \int_t^{t+\Delta t} \varepsilon_i(t) dt - K_D \frac{d\varepsilon_i(t)}{dt} \quad (1)$$

可见,PID控制方程系数 K_P 、 K_I 和 K_D 选取的合理性直接决定着SAGD蒸汽腔内汽液界面智能调控效果的好坏。

2 汽液界面智能调控理论

2.1 假设条件

考虑图2所示蒸汽腔内液池垂向剖面,假设:①假定油、水、岩石的密度和比热容为常数,不随温度变化;②考虑到油砂在油藏条件下几乎不含溶解气,油和水的体积系数均取1;③产水速度与注汽速度呈正比: $q_{ws} = f q_s$,其中 f 为0.9~1.1;④液池内部温度处处相同,且随时间变化;⑤液池中油水体积比与供应液池的油水流量比相等,即: $V_w/V_o = q_w/q_o$;⑥忽略液池向其下方区域的热损失;⑦现场注汽压力和温度范围内,蒸汽腔与液池间传热速率与注汽压力近似呈线性关系^[18]: $\hat{Q}(t) = 128.3p(t) - 669.1$ 。

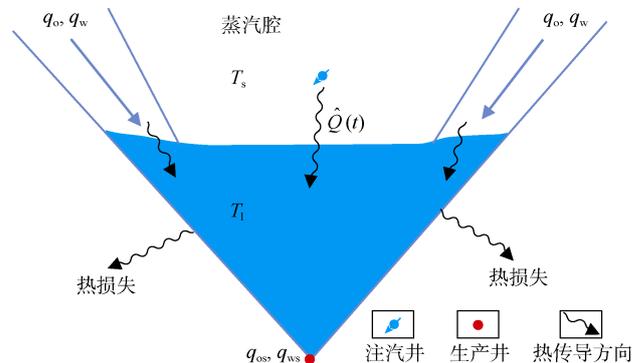


图2 蒸汽腔内液池垂向剖面简化图

2.2 物质平衡方程

以液池为研究对象,则蒸汽腔流入液池油水质量与生产井采出油水质量之差等于液池内部的油水质量变化量,建立物质平衡方程:

$$\rho_o (q_o - q_{os}) + \rho_w (q_w - q_{ws}) = \frac{d}{dt} (\rho_o V_o + \rho_w V_w) \quad (2)$$

油、水产出速度与注汽速度满足以下关系式:

$$\begin{cases} q_{ws} = f q_s \\ q_{os} = \frac{q_s}{ISOR} \end{cases} \quad (3)$$

将方程(3)代入方程(2),得到:

$$\rho_o \left(q_o - \frac{q_s}{ISOR} \right) + \rho_w (q_w - f q_s) = \frac{d}{dt} (\rho_o V_o + \rho_w V_w) \quad (4)$$

2.3 热量守恒方程

以液池为研究对象，则流入、流出液池的热量主要包括4部分：①蒸汽腔向下方液池的传热；②流入液池的冷凝蒸汽和加热原油携带的热量；③生产井采出油、水携带的热量；④液池向周围地层散失的热量（可以忽略）

依据热量守恒原理，建立热量守恒方程：

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t) + \rho_o q_o C_{po} (T_s - T_r) + \rho_w q_w C_{pw} (T_s - T_r) - \\ \rho_o q_{os} C_{po} (T_1 - T_r) - \rho_w q_{ws} C_{pw} (T_1 - T_r) = \\ \frac{d}{dt} [(\rho_o V_o C_{po} + \rho_w V_w C_{pw}) (T_1 - T_r)] \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 液池温度控制方程

在无顶底水的油砂储集层中，产出水主要由冷凝蒸汽组成，可以近似认为：泄入液池的原油由油藏温度加热至饱和蒸汽温度所需要的热量等于流入液池的冷凝蒸汽所释放的热量，得到：

$$\rho_o q_o C_{po} (T_s - T_r) = \rho_w q_w \eta_{eff} \eta_s \lambda_s \quad (6)$$

进一步得到：

$$\rho_w q_w = \frac{\rho_o q_o C_{po} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s} \quad (7)$$

由物质平衡方程(4)式得到关系式：

$$\frac{dV_o}{dt} = q_o - \frac{q_s \left(\frac{1}{ISOR} - \frac{\rho_w}{\rho_o} f \right)}{1 + \frac{C_{po} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}} \quad (8)$$

热量守恒方程中仅考虑 \$V_o\$、\$V_w\$ 和 \$T_1\$ 随时间 \$t\$ 发生变化，将方程(7)、(8)代入方程(5)得到：

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t) + \rho_o q_o C_{po} (T_s - T_r) \left[1 + \frac{C_{po} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s} \right] - \\ q_s (T_1 - T_r) \left(\frac{\rho_o C_{po}}{ISOR} + f \rho_w C_{pw} \right) = \\ \frac{d}{dt} [(\rho_o V_o C_{po} + \rho_w V_w C_{pw}) (T_1 - T_r)] \end{aligned} \quad (9)$$

对上式简化，得到：

$$\frac{dT_1}{dt} + A(T_1 - T_r) = B + C p(t) \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} A = \frac{1}{V_o} \left[q_o - \frac{q_s \left(\frac{1}{ISOR} - \frac{\rho_w}{\rho_o} f \right)}{1 + \frac{C_{po} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}} + \right. \\ \left. \frac{1}{ISOR} \frac{q_s}{1 + \frac{C_{pw} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}} + \frac{f q_s \frac{\rho_w C_{pw}}{\rho_o C_{po}}}{1 + \frac{C_{pw} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}} \right] \end{aligned}$$

$$B = \frac{q_o}{V_o} (T_s - T_r) - \frac{1 + \frac{C_{po} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s} - \frac{669.1}{\rho_o V_o C_{po}}}{1 + \frac{C_{pw} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}}$$

$$C = \frac{128.3}{\rho_o V_o C_{po}} \frac{1}{1 + \frac{C_{pw} (T_s - T_r)}{\eta_{eff} \eta_s \lambda_s}}$$

当 SAGD 过程达到稳定状态时，控制方程转化为：

$$\frac{d\bar{T}_1}{dt} + A(\bar{T}_1 - T_r) = B + C \bar{p}(t) \quad (11)$$

方程(10)与方程(11)相减，得：

$$\frac{d(T_1 - \bar{T}_1)}{dt} + A(T_1 - \bar{T}_1) = C[p(t) - \bar{p}(t)] \quad (12)$$

考虑到偏差 \$\varepsilon(t)\$ 定义，有：

$$T_1 - \bar{T}_1 = (T_1 - T_0) - (\bar{T}_1 - T_0) = \varepsilon(t) \quad (13)$$

得到液池温度控制方程：

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + A\varepsilon(t) = C[p(t) - \bar{p}(t)] \quad (14)$$

2.5 PID 控制方程系数优选数学模型

根据 PID 控制器控制方程定义^[17]：

$$p(t) = \bar{p}(t) - K_p \varepsilon(t) - K_I \int_0^t \varepsilon(t) dt - K_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式，得到：

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{A + CK_p}{1 + CK_D} \varepsilon(t) + \frac{CK_I}{1 + CK_D} \int_0^t \varepsilon(t) dt = 0 \quad (16)$$

给定初始条件：

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = T_1(0) - \bar{T}_1 \quad (17)$$

应用 Laplace 变换，得到 Laplace 空间偏差控制方程：

$$E(s) = \frac{\varepsilon_0 s}{s^2 + \frac{A + CK_p}{1 + CK_D} s + \frac{CK_I}{1 + CK_D}} \quad (18)$$

进行 Laplace 逆变换解析反演，得到实空间偏差控制方程：

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 g(t) \quad (19)$$

其中，\$g(t)\$ 的函数形式由方程 \$s^2 + \frac{A + CK_p}{1 + CK_D} s + \frac{CK_I}{1 + CK_D} = 0\$

的根决定，记 \$b = \frac{A + CK_p}{1 + CK_D}\$，\$c = \frac{CK_I}{1 + CK_D}\$，作如下讨论：

①当判别因子 \$\Delta = b^2 - 4c > 0\$ 时，存在两个不同的实数根 \$r_1\$、\$r_2\$，有：

$$g(t) = \frac{r_1}{r_1 - r_2} e^{r_1 t} + \frac{r_2}{r_2 - r_1} e^{r_2 t} \quad (20)$$

②当判别因子 \$\Delta = b^2 - 4c < 0\$ 时，记 \$d = c - b^2/4 > 0\$，

则存在两个不同的复数根 $r_{1,2} = (s+b/2) \pm i\sqrt{d}$,从而有 :

$$g(t) = e^{-\frac{bt}{2}} \cos(\sqrt{d}t) - \frac{b}{2\sqrt{d}} e^{-\frac{bt}{2}} \sin(\sqrt{d}t) \quad (21)$$

③当判别因子 $\Delta = b^2 - 4c = 0$ 时, 存在两个相等的实数根, 有 :

$$g(t) = \left(1 - \frac{b}{2}t\right) e^{-\frac{bt}{2}} \quad (22)$$

对方程 (19) 作变形, 由对液池温度偏差的控制转化为 Subcool 控制 :

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = \frac{T_1(t) - \bar{T}_1}{T_1(0) - \bar{T}_1} = \frac{\Delta T_s - \Delta T(t)}{\Delta T_s - \Delta T(0)} = g(t) \quad (23)$$

进一步得到 PID 控制方程系数优选模型 :

$$\Delta T(t) = [1 - g(t)]\Delta T_s + g(t)\Delta T(0) \quad (24)$$

3 油田实例应用

加拿大 M 油砂埋藏浅 (170~200 m), 具有高密度 (1.000~1.015 g/cm³) 和高黏度 (大于 1×10⁶ mPa·s) 的特点。油藏温度为 10 °C, 注汽压力、温度和干度分别为 2.0 MPa、212 °C 和 0.95, 汽化潜热为 1 890 kJ/kg, 产出油、水密度分别为 1 005 kg/m³ 和 980 kg/m³, 油、水比热容分别为 1.9 kJ/(kg·K) 和 4.187 kJ/(kg·K), 瞬时汽油比为 3.5 m³/m³, 产水、注汽速度比为 0.95, 单位井长产油和注汽速度分别为 0.059 m³/(d·m) 和 0.176 m³/(d·m), SAGD 热效率为 0.5, 初始产液温度为 207 °C, Subcool 目标值设为 20 °C。计算分析不同比例系数 K_P、积分系数 K_I 和微分系数 K_D 及组合参数下 Subcool 实际值随时间的响应。

由图 3 可见, K_P = -1 kPa/K 时, 方程收敛, 且其值越大收敛越快; 反之, 当 K_P < -1 kPa/K 时, 不收敛。

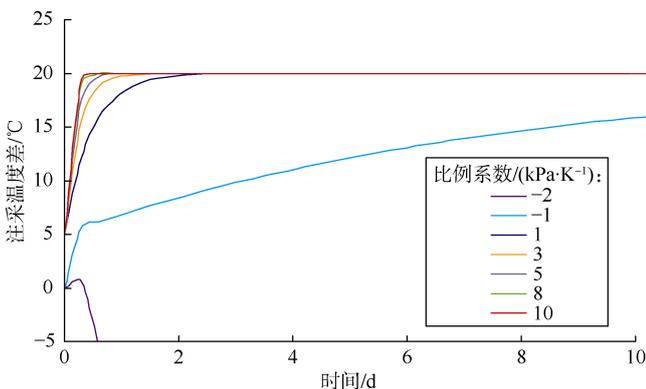


图 3 不同比例系数下 Subcool 响应曲线

由图 4 可见, K_I > 0 时, 振荡收敛, 且其值越大振荡幅度越大、周期越多。反之, 当 K_I = 0 时, 不收敛。

由图 5 可见, K_D > -1 kPa·d/K 时, 收敛, 且其值

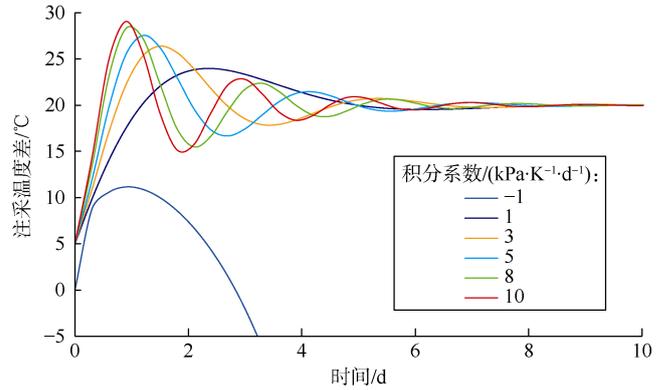


图 4 不同积分系数下 Subcool 响应曲线

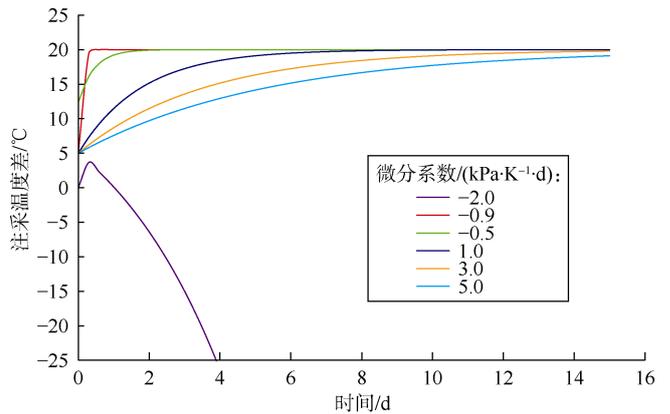


图 5 不同微分系数下 Subcool 响应曲线

越接近 -1 kPa·d/K, 收敛速度越快; 当 K_D = -1 kPa·d/K 时, 不收敛。

由图 6 可见, 当采用比例、积分和微分系数组合时, 协同作用下可以进一步缩短注采温度差达到 Subcool 目标值的时间, 提高收敛速度和健壮性。

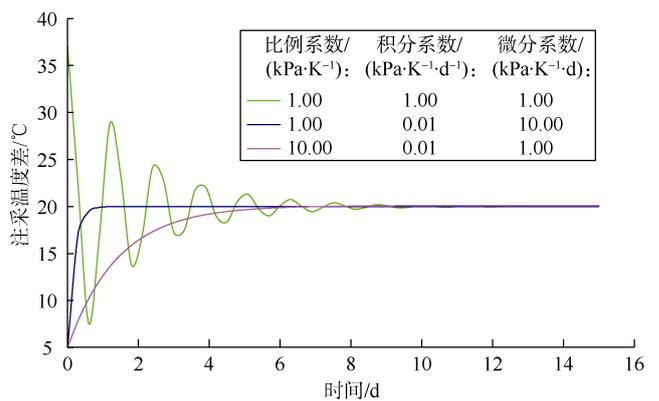


图 6 不同比例、积分和微分系数组合下 Subcool 响应曲线

为了验证 SAGD 汽液界面智能调控模型优选方法的可靠性, 构建如图 7 所示的包含单个 SAGD 井对的非均质油藏模型, 应用模型优选方法确定 PID 控制方程系数: K_P = 1.00 kPa/K, K_I = 0.01 kPa/(K·d) 和

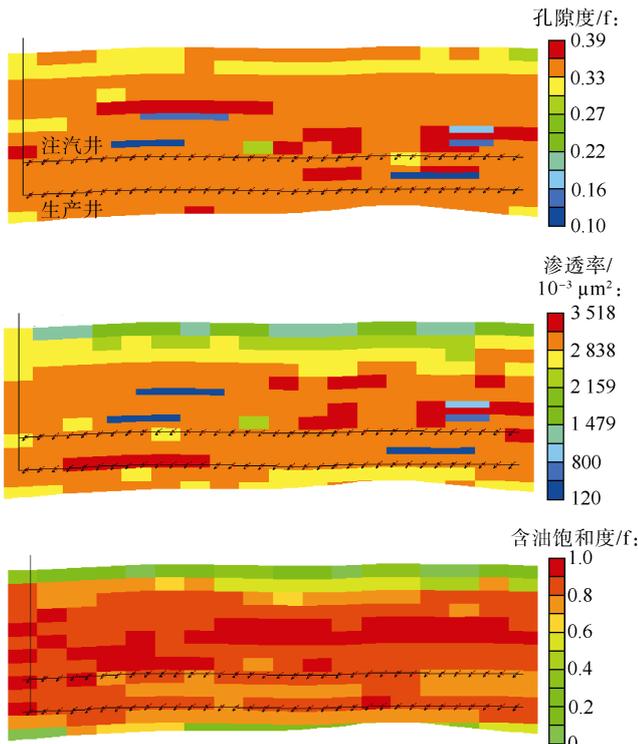


图7 非均质油藏孔隙度、渗透率和饱和度场

$K_D=10.00 \text{ kPa} \cdot \text{d}/\text{K}$, Z-N 整定法确定 PID 控制方程系数为： $K_P=1.000 \text{ kPa}/\text{K}$, $K_I=0.033 \text{ kPa}/(\text{K} \cdot \text{d})$ 和 $K_D=7.500 \text{ kPa} \cdot \text{d}/\text{K}$, 利用数值模拟对比研究了常规注汽和两套系数控制下智能注汽 3 个方案生产动态指标与

汽液界面调控效果。注汽井划分为 6 个井段 ($5 \times 150 \text{ m} + 1 \times 100 \text{ m}$), 每段安装一个注汽阀, 不同注汽阀具有独立的注汽压力和速度、互不干扰。所有方案采用相同的循环预热策略, 生产井均采用目标值为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 Subcool 控制。常规注汽方案中定注汽压力; 智能注汽方案中注汽阀各由 1 个 PID 控制器调控, 根据井筒沿程注采温度差与目标 Subcool 偏差计算并调整注汽压力, 调整周期为 1 个月。SAGD 生产时间为 10 a。

数值模拟结果见图 8、图 9。图 8 对比了不同方案下沿程蒸汽腔发育状况, 常规注汽方案沿水平井长方向存在低温段, 表明沿程蒸汽腔扩展不均匀, 而 Z-N 整定法和模型优选方法下智能注汽方案沿水平井长方向温度场更加均匀, 表明显著改善了沿程蒸汽腔均匀扩展程度。图 9 对比了不同方案下累计汽油比和累计产油量, 与常规注汽方案相比, Z-N 整定法和模型优选方法下智能注汽方案早期累计汽油比较高, 2~3 a 后基本持平, 后期累计汽油比更低, 降幅分别为 17.3% 和 15.7%; 与此同时, Z-N 整定法和模型优选方法下智能注汽方案均显著提高了累计产油量, 增幅分别为 16.6% 和 17.5%。需要进一步指出的是, Z-N 整定法和模型优选方法下智能注汽方案取得了相似的模拟结果, 表明本文提出的 SAGD 汽液界面智能调控模型优选方法是可行的。

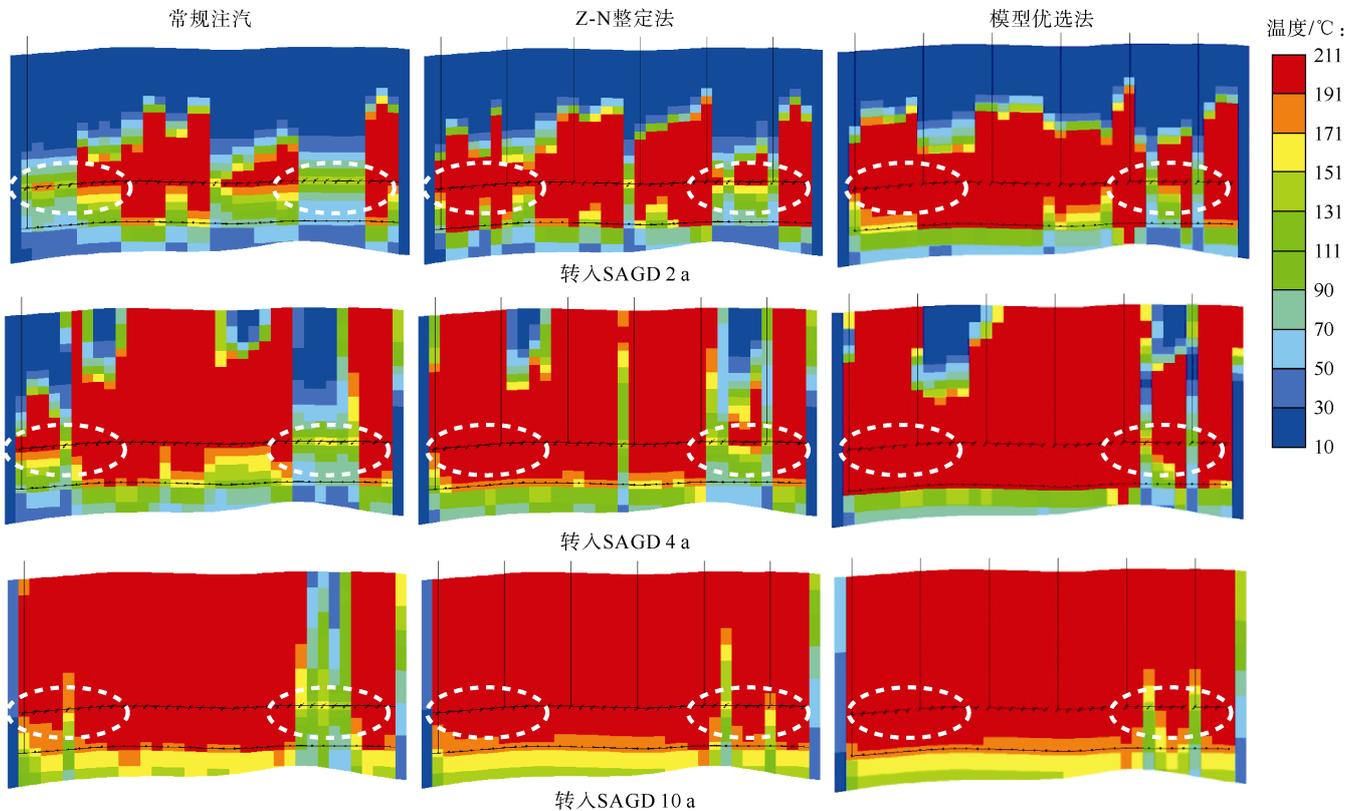


图8 常规注汽方案、Z-N 整定法和模型优选法下智能注汽方案井筒沿程蒸汽腔温度场

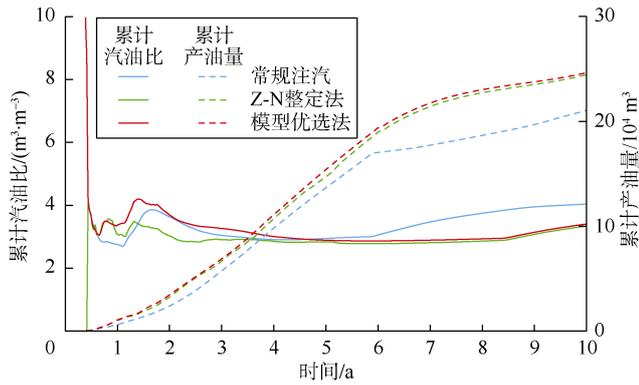


图9 常规注汽方案、Z-N 整定法和模型优选法下智能注汽方案累计汽油比与累计产油量对比曲线

4 结论

以 SAGD 蒸汽腔内液池为研究对象、Subcool 为调控目标,依据物质平衡和热量守恒原理,与 PID 控制方程相耦合,建立了 PID 控制方程系数优选数学模型,可以方便快捷地优选合理的 PID 控制方程系数,为汽液界面智能调控奠定了理论基础。

实例计算结果表明,汽液界面智能调控模型采用比例、积分和微分系数进行组合,协同作用下可以进一步缩短注采温度差达到 Subcool 目标值的时间,提高收敛速度和健壮性。

数值模拟评价结果表明,与常规注汽相比,模型优选方法下智能注汽显著改善了井筒沿程蒸汽腔均匀扩展程度,提高产油量的同时降低了汽油比,模拟结果与 Z-N 整定法相似,但模型优选法大大简化了智能调控模型的优选过程,更为方便快捷。

符号注释:

C_{po} ——油相比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; C_{pw} ——水相比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $E(s)$ —— $\varepsilon(t)$ 经 Laplace 变换后的象函数; f ——产水速度与注汽速度之比, 无因次; $ISOR$ ——瞬时汽油比, m^3/m^3 ; K_D ——微分系数, $\text{kPa}\cdot\text{d}/\text{K}$; K_I ——积分系数, $\text{kPa}/(\text{K}\cdot\text{d})$; K_P ——比例系数, kPa/K ; \bar{p} ——稳定状态下注汽压力, kPa ; $p(t)$ —— t 时刻注汽压力, kPa ; p_i ——第 i 个调整周期内注汽压力, kPa ; q_o ——蒸汽腔流入液池的加热原油体积流量, m^3/d ; q_{os} ——地面产油速度, m^3/d ; q_s ——注汽速度, m^3/d ; q_w ——蒸汽腔流入液池的冷凝蒸汽体积流量, m^3/d ; q_{ws} ——地面产水速度, m^3/d ; $\hat{Q}(t)$ —— t 时刻蒸汽腔向液池的传热速度, kJ/d ; r_1, r_2 ——控制方程两个不同的复数根; s ——实变量 t 对应的复变量; t ——时间, d ; Δt ——调整周期, d ; T_1 ——液池或产液温度, K ; \bar{T}_1 ——稳定状态下液池或产液温度, K ; T_i ——原始油藏温度, K ; T_s ——注入饱和蒸汽温度, K ; $\Delta T(t)$ —— t 时刻对应的 Subcool 值, K ; ΔT_s ——设定的 Subcool 目标值, K ; T_0 ——Subcool 目标值下对应的产液温度, K ; V_o ——液池中原油体积, m^3 ; V_w ——液池中

水体积, m^3 ; ε_i ——第 i 个调整周期内注采温度差与 Subcool 目标值的偏差, K ; $\varepsilon(t)$ —— t 时刻偏差, K ; ε_0 ——初始时刻偏差, K ; η_{eff} ——SAGD 工艺热利用率, 无因次; η_s ——蒸汽干度, 无因次; λ_s ——蒸汽潜热, kJ/kg ; ρ_o ——地下原油密度, kg/m^3 ; ρ_w ——地下水密度, kg/m^3 。

参考文献:

- [1] 穆龙新. 重油和油砂开发技术新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
MU Longxin. New progress of heavy oil and oil sands development technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 沈德煌, 吴永彬, 梁淑贤, 等. 注蒸汽热力采油泡沫剂的热稳定性[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 652-655.
SHEN Dehuang, WU Yongbin, LIANG Shuxian, et al. Thermal stability of foam during steam drive[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 652-655.
- [3] EDMUNDS N R. Investigation of SAGD steam trap control in two and three dimensions[R]. SPE 50413, 1998.
- [4] GATES I D, LESKIW C. Impact of steam trap control on performance of steam-assisted gravity drainage[R]. Calgary, Alberta: Petroleum Society's 59th Annual Technical Meeting, 2008.
- [5] BANERJEE S, JOBLING R, ABDELFAH T, et al. The role of autonomous flow control in SAGD well design[R]. SPE 166266, 2013.
- [6] ZENGQ S, WANG Z M, WANG X Q, et al. A novel autonomous inflow control device design based on the combination of two dynamic fluid technologies[R]. SPE 170069, 2014.
- [7] OYEKA O, FELTEN F, LEAST B. Screen-inflow-design considerations with inflow control devices in heavy oil[R]. SPE 170097, 2014.
- [8] SHAD S, ENG P, YAZDI M M. Wellbore modeling and design of nozzle-based inflow control device (ICD) for SAGD wells[R]. SPE 170145, 2014.
- [9] STAHL R M, SMITH J D, HOBBS S, et al. Application of intelligent well technology to a SAGD producer: Firebag field trial[R]. SPE 170153, 2014.
- [10] CLARK H P, ASCANIAO F A, KRUIJSDIJK C V, et al. Method to improve thermal EOR performance using intelligent well technology: Orion SAGD field trial[R]. SPE 137133, 2010.
- [11] BEDRY M, SHAW J. Using a new intelligent well technology completions strategy to increase thermal EOR recoveries: SAGD field trial[R]. SPE 154760, 2012.
- [12] GATES I D, GOTAWALA D R. SAGD subcool control with smart injection wells[R]. SPE 122014, 2009.
- [13] GOTAWALA D R, GATES I D. A basis for automated control of steam trap subcool in SAGD[R]. SPE 159170, 2012.
- [14] STONE T, BROWN G, GUYAGULER B, et al. Practical control of SAGD wells with dual-tubing strings[R]. SPE 149352, 2011.
- [15] STONET, DAMAS C E P, WOICESHYN G, et al. Advanced wellbore simulation of flow control devices with feedback control for thermal operations[R]. SPE 163594, 2013.
- [16] STONE T W, LAW D H S, BAILEY W J. Control of reservoir heterogeneity in SAGD bitumen processes[R]. SPE 165388, 2013.
- [17] ÅSTROM K, HAGGLUND T. PID controllers: Theory, design, and tuning[M]. USA: Instrument Society of America, 1995.
- [18] IRANI M, GHANNADI S. Understanding the heat-transfer mechanism in the steam-assisted gravity-drainage (SAGD) process and comparing the conduction and convection flux in bitumen reservoirs[R]. SPE 163079, 2012.

第一作者简介: 梁光跃 (1984-), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事稠油和油砂开发理论与数值模拟方面的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院美洲研究所, 邮政编码: 100083. E-mail: lgy5373@petrochina.com.cn

收稿日期: 2015-01-14 修回日期: 2016-01-12

(编辑 张敏)