

控压钻井井下气侵工况的自适应参数及状态估计

徐宝昌^{1†}, 孟卓然², 陈贻祺³, 刘伟⁴, 吴楠⁵

- (1. 中国石油大学 自动化系, 北京 102249;
2. 中国石油大学 自动化系, 北京 102249;
3. 中国石油大学 自动化系, 北京 102249;
4. 中国石油集团工程技术有限公司, 北京 102206;
5. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要: 针对控压钻井过程中井下可能发生气侵的特殊工况, 提出一种可在异常工况下估计井底压力, 并借此判断异常工况的方法. 首先, 基于简化的漂移通量模型, 在传统控压钻井水力学模型中添加了气体膨胀项, 建立了控压钻井气液两相流模型; 其次, 将井下环空摩擦积分和井底气侵量视为未知参数, 将井底流量视为未知状态, 设计了一种可对未知参数以及未知状态进行联合估计的自适应观测器, 并以此为基础估计井底压力. 最后, 通过仿真实验验证所提方法的有效性. 仿真结果表明, 所建气液两相流模型可在井下发生气侵时模拟井底压力变化, 且所提观测器能实时准确地跟踪井底流量及压力变化.

关键词: 控压钻井; 气侵; 气液两相流模型; 联合估计; 自适应观测器

中图分类号: TE928

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0673

引用格式: 徐宝昌, 孟卓然, 陈贻祺, 等. 控压钻井井下气侵工况的自适应参数及状态估计 [J]. 控制与决策.

Adaptive parameter and state estimation of managed pressure drilling while downhole gas kick

XU Bao-chang^{1†}, MENG Zhuo-ran², CHEN Yi-qi³, LIU Wei⁴, WU Nan⁵

(1. Department of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Department of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Department of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China; 5. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper proposed a estimating bottom-hole pressure under abnormal conditions and judge abnormal working conditions method for the special conditions where gas invasion may occur downhole in the process of managed pressure drilling. Firstly, based on the simplified drift flux model, the gas-liquid two-phase flow model of managed pressure drilling is established by adding the gas expansion term to the traditional hydraulic model. Then, considering the downhole annular friction integral and bottom-hole gas influx as unknown parameters, and the bottom-hole flow as unknown state. An adaptive observer that can jointly estimate unknown parameters and unknown state is designed, and the bottom-hole pressure is estimated based on the observer. Simulation experiments verify the effectiveness of the proposed control method. The simulation results show that the gas-liquid two-phase flow model can simulate the change of bottom-hole pressure when gas kick occurs downhole, and the observer can accurately track the changes of bottom-hole flow and pressure in real time.

Keywords: managed pressure drilling; gas kick; gas-liquid two-phase flow model; joint estimation; adaptive observer

0 引言

钻井工程是油气勘探开发的重要手段. 目前我国剩余油气资源有 40% 左右处于深部地层, 深层油

气资源是我国未来勘探开发的重要领域之一^[1]. 随着深井复杂地层油气资源的勘探开发, 地层压力与地层破裂压力之间安全密度窗口窄, 安全作业风险高,

收稿日期: 2022-04-22; 录用日期: 2022-09-03.

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFA0708304); 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学 (北京) 战略合作科技专项 (ZLZX2020-03).

[†]通讯作者. E-mail: xbcyl@163.com.

极易发生气侵、漏失并引起井喷事故^[2-3], 严重威胁钻井安全^[4]. 在近几年的钻井作业中, 处理复杂事故导致非生产时间显著增加, 严重影响钻井效率^[5].

面对气侵、漏失等井下复杂事故, 控压钻井 (Managed Pressure Drilling, MPD) 可以有效避免事故加剧并稳定井底压力, 大大提升钻进效率. 但是, 深部地层环境复杂、存在众多不确定因素及干扰且监测成本高, 导致井下反馈信息极为不清晰, 不能及时判断异常工况. 这将使得地面控制器难以及时获取所需要的参数及状态信息, 严重影响了实时控制效果. 因此, 研究可靠的井下信息估计方法对于控制井底压力、减弱复杂事故的发生至关重要.

目前, 井下信息估计问题得到了国内外研究学者的广泛关注. Gravdal 等^[6] 在 2005 年首次利用 Kalman 滤波估计气液两相流模型的不可测变量, 并根据估计结果进行控制系统设计. Zhou 等^[7-9] 基于简化的水力学模型, 设计状态观测器估计井底钻头流量和井底压力, 并进一步推导了一种基于井底压力的稳定非线性控制律. 郑德建^[10] 建立反映井筒压力动态特性的简化非线性模型, 将径向基函数神经网络与状态观测器结合对井下不可测状态进行估计, 在此基础上设计 L1 自适应控制器对井底压力进行控制. Stamnes 等^[11] 利用 Lyapunov 分析和非线性坐标变换, 给出一类非线性系统降阶自适应状态观测器的构造方法. 该方法允许未知状态中同时存在不确定参数以及非线性项, 但构造该观测器的条件十分严格, 需要求解一组偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 才能获得参数更新律.

以上研究都是在正常钻进时估计井下信息, 没有考虑气侵发生后气体体积变化对井底压力的影响. 在此基础上, 徐宝昌等^[12] 以提前判断气侵工况为目标, 以实际立压、回压数据作为输入, 应用自适应观测器理论, 对未知井底压力与井底流量进行估计. Habib 等^[13] 提出一种基于无迹卡尔曼滤波和估计未知输入的观测器, 同时估计井底钻头流量和气侵量, 并以此为依据检测与评估异常工况. 上述两类方法重点研究了气侵产生时如何构造合适的自适应观测器, 忽视了气侵发生后, 单向流转变为两相流所引起的模型失配问题.

Jiang^[14] 提出了一种适用于水基钻井液的气侵早期检测方法, 该方法将瞬态压力—温度场耦合模型与无迹卡尔曼滤波算法相结合, 并采用广义似然比检验法自动检测压力因子和流量因子的变化, 实现气侵工况的自动预警. 王子振^[15] 搭建了一套井下

实验系统, 可以直观地呈现气侵发生时气泡的运移过程和分布规律, 通过监测低频弹性波波速的变化特征判断气侵是否发生. 刘凤和^[16] 考虑气侵初期水锤效应对井底压力的影响, 建立水锤—漂移流综合模型来准确描述气侵过程中井底压力的瞬态变化规律, 并采用复合差分格式对该模型进行求解. Liao^[17] 研究了压力—温度场与不同相间速度的关系, 建立了 MPD 过程中气液固多相瞬态流动模型, 并在此基础上深入研究气侵控制策略. 上述成果一定程度上丰富了气侵监测理论, 但还存在不足之处: 现有文献通过建立高精度复杂模型提升气侵预报率, 将严重依赖可靠性高、鲁棒性强的数值求解方法, 如何权衡模型复杂度且有效结合观测器理论值得进一步思考.

因此, 本文针对上述研究问题与挑战, 进一步分析控压钻井过程中井下气侵检测与变量估计问题. 首先, 基于漂移通量模型 (Drift Flux Model, DFM) 建立一个可用于实时估计井底压力的简化常微分方程 (Ordinary Differential Equation, ODE) 气液两相流模型; 其次, 将井下环空摩擦积分和井底气侵量视为未知参数, 将井底流量视为未知状态, 设计了一种对未知参数及未知状态进行联合估计的自适应观测器, 并以此为基础估计井底压力. 最后通过仿真分析, 验证了模型及观测器的有效性.

1 控压钻井气液两相流模型

1.1 DFM 方程

首先考虑环空多相流模型中的 DFM 方程^[18]:

$$\frac{\partial \alpha_L \rho_L}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_L \rho_L v_L}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_G \rho_G}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_G \rho_G v_G}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \alpha_L \rho_L v_L + \alpha_G \rho_G v_G}{\partial t} + \frac{\partial P + \alpha_G \rho_G v_G^2 + \alpha_L \rho_L v_L^2}{\partial x} \\ & = -\rho_m g \sin \phi(x) - \frac{2f \rho_m v_m}{D} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 x 表示流动方向上的位置坐标, $x = 0$ 为井底; ϕ 为井斜; f 为摩擦因子; D 为水力直径; α_i, ρ_i, v_i 分别表示气相或液相 ($i = G, L$) 的体积分数、密度和速度, 为了求解上述 PDE 系统, 引入以下闭合条件:

$$\begin{cases} \alpha_G + \alpha_L = 1 \\ P = c_G^2 \rho_G \end{cases} \quad (4)$$

其中 P 为气体压力, c_G 为声波在气体介质中的传播速度.

气液混合关系如下:

$$\begin{cases} \rho_m = \alpha_G \rho_G + \alpha_L \rho_L \\ v_m = \alpha_G v_G + \alpha_L v_L \end{cases} \quad (5)$$

其中 ρ_m 为气液混合密度, v_m 为气液混合速度.

描述气相和液相之间的滑移定律如下^[19-20]:

$$v_G = \frac{v_m}{1 - \alpha_L^*} + v_\infty \quad (6)$$

其中 $\alpha_L^* \in [0, 1)$ 与气体浓度和速度剖面有关, $v_\infty \geq 0$ 为滑移速度, 用于描述气体浮力效应. 进一步使用如下变换:

$$u = (\chi_L, \rho, v_G) = \left(\frac{(\alpha_L - \alpha_L^*) \rho_L}{\rho_m - \alpha_L^* \rho_L}, \rho_m - \alpha_L^* \rho_L, v_G \right) \quad (7)$$

将气体传播的动态变化由黎曼不变量 χ_L 表示, 即令 λ_i, l_i 分别为系统传播矩阵的特征值和左特征向量, 进而得到如下方程^[18]:

$$\frac{\partial \chi_L}{\partial t} + v_G \frac{\partial \chi_L}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$l_2(u) \left[\lambda_2(u) \frac{\partial u}{\partial x} - S(u) \right] = 0 \quad (9)$$

$$l_3(u) \left[\lambda_3(u) \frac{\partial u}{\partial x} - S(u) \right] = 0 \quad (10)$$

1.2 气液两相流简化模型

上述 DFM 方程难以直接应用于井底压力的估计问题, 需要对其进行简化. 简化过程中使用的假设条件包括已有的 DFM 假设^[21-23], 在推导气液两相流简化模型前, 还提出如下假设^[24]:

假设 1 假定气体在整个环空内保持匀速运动: $v_G = \frac{q_{res}}{A\alpha_G|_{x=0}}$.

其中 q_{res} 为地层气体侵入量.

假设 2 对于环空中的任意位置 $x \in [0, h]$, 有 $\int_x^h \alpha_G \rho_G(x) dx \ll \int_x^h \alpha_L \rho_L(x) dx$, 即气体质量相对于液体质量小到可以忽略不计.

假设 3 压力分布的瞬态特性可忽略不计, 即不考虑高频压力波的传播特性.

为了简化模型, 舍弃式 (9)-(10), 并根据假设 1 使用下式近似气体速度:

$$v_G = \frac{v_m}{1 - \alpha_L^*} + v_\infty = \frac{q_{res} + q_{bit}}{A(1 - \alpha_L^*)} + v_\infty \quad (11)$$

其中 α_L^* 和 v_∞ 为常量, A 为环空横截面积, q_{bit} 为井底流量, 假设液体均来自 q_{bit} , 气体均来自 q_{res} .

方程 (8) 的边界条件结合式 (4)、(5)、(7) 可表示为:

$$\chi_L(0, t) = \frac{(1 - \alpha_G - \alpha_L^*) \rho_L}{(1 - \alpha_G - \alpha_L^*) \rho_L + \alpha_G \rho_G} \Big|_{x=0} \quad (12)$$

结合式 (11) 及 $A\alpha_G(0, t) = \frac{q_{res}}{v_G}$ 可求解等式 (12).

为了将气体动力学与井内压力变化联系起来, 需要表示气体沿环空向上运移过程的膨胀速率.

首先通过气体压力和 $\chi_L(x)$ 的关系式得到气体

分布方程:

$$\alpha_G = \frac{(\alpha_L^* - 1)(\chi_L - 1)}{1 + \chi_L \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} - 1 \right)} \quad (13)$$

其中 $\rho_G = P/c_G^2$.

为了推导气体膨胀项, 需要引入关于 x 的拉格朗日坐标 ξ , 其中 $x = x(t, \xi)$ 定义为柯西问题 $\frac{dx}{dt} = v_G, x(t_0, \xi) = \xi$ 的解. 定义拉格朗日截面含气率 $\tilde{\alpha}_G(t, \xi) = \alpha_G(t, x(t, \xi))$, 因此, 环空中气体总膨胀率 $E_G(t)$ 可以表示为:

$$E_G(t) = A \int_0^h \dot{\tilde{\alpha}}_G(t, \xi) d\xi = A \int_0^h - \frac{\chi_L \rho_L (\alpha_L^* - 1)(\chi_L - 1)}{(\rho_L + \chi_L \rho_G - \chi_L \rho_L)^2} \left(\frac{\partial \rho_G}{\partial t} + v_G \frac{\partial \rho_G}{\partial x} \right) dx \quad (14)$$

其中 h 表示气体运移高度. 假设整个环空的压力梯度恒定, 则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_G}{\partial x} \approx - \frac{1}{c_G^2} \frac{p_{bh} - p_c}{h} \\ \frac{\partial \rho_G}{\partial t} \approx - \frac{1}{c_G^2} \dot{p}_c \end{cases} \quad (15)$$

其中 p_{bh}, p_c 分别为井底压力和井口回压. 引入中间变量 I_0 , 将气体膨胀率 E_G 表示为如下形式:

$$E_G = I_0 \left(v_G \frac{p_{bh} - p_c}{h} - \dot{p}_c \right) \quad (16)$$

其中,

$$I_0 \equiv \frac{A}{c_G^2} \rho_L (\alpha_L^* - 1) \int_0^h \frac{\chi_L (\chi_L - 1)}{(\rho_L + \chi_L \rho_G - \chi_L \rho_L)^2} dx \quad (17)$$

结合上述推导, 将整个环空视为单个控制体^[25], 并加入地层气体侵入量及气体膨胀项, 最终将井口压力的动态方程写为如下形式:

$$\dot{p}_c = \frac{\beta_L}{V_a} (q_{bit} + q_{res} + E_G + q_{back} - q_{choke}) \quad (18)$$

其中 β_L 为液体体积模量, V_a 为环空体积; q_{back}, q_{choke} 分别为回压泵流量和节流阀流量.

将 E_G 的表达式 (16) 代入式 (18) 可得:

$$\dot{p}_c = \frac{\beta_L}{V_a} \left(q_{bit} + q_{res} + I_0 \left(v_G \frac{p_{bh} - p_c}{h} - \dot{p}_c \right) + q_{back} - q_{choke} \right) \quad (19)$$

引入 $\bar{\beta}$ 并化简式 (19) 可得:

$$\dot{p}_c = \frac{\bar{\beta}}{V_a} \left(q_{bit} + q_{res} + I_0 v_G \frac{p_{bh} - p_c}{h} + q_{back} - q_{choke} \right) \quad (20)$$

其中 $\bar{\beta} = \beta_L / \left(1 + \frac{\beta_L}{V_a} I_0 \right)$ 表示有效体积模量.

使用式 (20) 替换单相水力学模型^[25] 中的 $\dot{p}_c$ 项, 并在 $\dot{q}_{bit}$ 项中加入 q_{res} , 得到气侵工况下简化气液两相流模型:

$$\begin{cases} \dot{p}_p = \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - q_{bit}) \\ \dot{p}_c = \frac{\bar{\beta}}{V_a} \left(q_{bit} + q_{res} + I_0 v_G \frac{p_{bh} - p_c}{h} + q_{back} - q_{choke} \right) \\ \dot{q}_{bit} = \frac{1}{M} [p_p - p_c - F_d q_{bit}^2 - F_a (q_{bit} + q_{res})^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}] \end{cases} \quad (21)$$

其中 q_{pump} 为泥浆泵出口流量; β_d 为钻柱内钻井液的体积模量; V_d 为钻柱体积; F_d, F_a 分别为钻柱和环空中钻井液的摩擦积分; ρ_d, ρ_a 分别为钻柱和环空内钻井液的平均密度; M 为钻柱与环空内流动方向上单位截面密度积分的和; h_{bit} 表示钻头深度; p_p 为泥浆石出口压力; v_G 代表井内气体运移速度; g 是重力常数。

同时, 当井下发生气侵时, 井底压力计算需加入 q_{res} ^[25]:

$$p_{bh} = p_p - F_d (q_{bit} + q_{res})^2 + \rho_d g h_{bit} \quad (22)$$

2 气侵工况下的自适应观测器设计

在观测器设计之前, 提出如下假设:

假设 4 地层气侵量 q_{res} 及环空中的摩擦积分 F_a , 为未知常量, 气体膨胀率 E_G 中各项参数已知。

设未知参数 $\theta = F_a/M$, 式 (21) 可写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{p}_p = \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - q_{bit}) \\ \dot{p}_c = \frac{\bar{\beta}}{V_a} \left(q_{bit} + q_{res} + I_0 v_G \frac{p_{bh} - p_c}{h} + q_{back} - q_{choke} \right) \\ \dot{q}_{bit} = \frac{1}{M} (p_p - p_c - F_d q_{bit}^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}) - \theta (q_{bit} + q_{res})^2 \end{cases} \quad (23)$$

2.1 观测器构造

由于泥浆泵出口压力 p_p 和井口回压 p_c 为可测的井上压力, 而 q_{bit} 为不可测的井底流量, 定义如下关于 p_p 和 q_{bit} 的坐标变换^[26-27]:

$$\xi = q_{bit} + l_1 p_p \quad (24)$$

其中 l_1 为可调增益。

对式 (24) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{q}_{bit} + l_1 \dot{p}_p = \frac{1}{M} (p_p - p_c - F_d q_{bit}^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}) \\ &\quad - \theta (q_{bit} + q_{res})^2 + l_1 \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - q_{bit}) \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $(q_{bit} + q_{res})^2 = q_{bit}^2 + 2q_{bit}q_{res} + q_{res}^2$, $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, $\phi(q_{bit}) = [q_{bit}^2, 2q_{bit}, 1]^T$, $\theta_1 = \theta$, $\theta_2 = \theta q_{res}$, $\theta_3 = \theta q_{res}^2$ 。

故式 (25) 可改写为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \frac{1}{M} (p_p - p_c - F_d q_{bit}^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}) \\ &\quad - \Theta^T \phi(q_{bit}) + l_1 \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - q_{bit}) \end{aligned} \quad (26)$$

关于井底流量 q_{bit} 的观测器设计如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}} &= \frac{1}{M} (p_p - p_c - F_d \hat{q}_{bit}^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}) \\ &\quad - \hat{\Theta}^T \phi(\hat{q}_{bit}) + l_1 \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - \hat{q}_{bit}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\hat{q}_{bit} = \hat{\xi} - l_1 p_p \quad (28)$$

计算如下误差项:

$$\begin{cases} \theta_1 q_{bit}^2 - \hat{\theta}_1 \hat{q}_{bit}^2 = \theta_1 (q_{bit}^2 - \hat{q}_{bit}^2) + \tilde{\theta}_1 \hat{q}_{bit}^2 \\ \theta_2 q_{bit} - \hat{\theta}_2 \hat{q}_{bit} = \theta_2 \tilde{q}_{bit} + \tilde{\theta}_2 \hat{q}_{bit} \\ q_{bit}^2 - \hat{q}_{bit}^2 = (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{q}_{bit} \end{cases} \quad (29)$$

其中 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$, $\tilde{q}_{bit} = q_{bit} - \hat{q}_{bit}$ 。

由式 (24) 与式 (28) 做差可得误差项 $\tilde{\xi}$:

$$\tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi} = (q_{bit} + l_1 p_p) - (\hat{q}_{bit} + l_1 p_p) = \tilde{q}_{bit} \quad (30)$$

再由式 (26) 与式 (27) 做差得到:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= \dot{\xi} - \dot{\hat{\xi}} = -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{q}_{bit} - \frac{F_d}{M} (q_{bit}^2 - \hat{q}_{bit}^2) - \\ &\quad \left[(\theta_1 q_{bit}^2 + 2\theta_2 q_{bit} + \theta_3) - (\hat{\theta}_1 \hat{q}_{bit}^2 + 2\hat{\theta}_2 \hat{q}_{bit} + \hat{\theta}_3) \right] \end{aligned} \quad (31)$$

将式 (29) 中求得的误差项代入上式可得:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{q}_{bit} - \left(\theta_1 + \frac{F_d}{M} \right) (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{q}_{bit} - \\ &\quad \tilde{\theta}_1 \hat{q}_{bit}^2 - 2\theta_2 \tilde{q}_{bit} - 2\tilde{\theta}_2 \hat{q}_{bit} - \tilde{\theta}_3 \end{aligned} \quad (32)$$

最后将 $\tilde{q}_{bit}$ 替换为 $\tilde{\xi}$, 可得关于误差项 $\tilde{\xi}$ 的微分方程:

$$\dot{\tilde{\xi}} = -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{\xi} - \left(\theta_1 + \frac{F_d}{M} \right) (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{\xi} - 2\theta_2 \tilde{\xi} - \tilde{\Theta}^T \phi(\hat{q}_{bit}) \tilde{\xi} \quad (33)$$

2.2 收敛性分析

针对误差项 $\tilde{\xi}$ 及 $\tilde{\Theta}$, 设计如下 Lyapunov 函数:

$$U(\tilde{\xi}, \tilde{\Theta}) = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\Theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\Theta} \quad (34)$$

其中 $\Gamma = \Gamma^T > 0$ 为增益矩阵。

对式 (34) 求导并代入式 (33), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{U}(\tilde{\xi}, \tilde{\Theta}) &= -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{\xi}^2 - \left(\theta_1 + \frac{F_d}{M} \right) (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{\xi}^2 - \\ &\quad 2\theta_2 \tilde{\xi}^2 + \tilde{\Theta}^T \Gamma^{-1} \left(\dot{\tilde{\Theta}} - \Gamma \phi(\hat{q}_{bit}) \tilde{\xi} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

由于式 (35) 中 $\tilde{\Theta}^T \Gamma^{-1} \left(\dot{\tilde{\Theta}} - \Gamma \phi(\hat{q}_{bit}) \tilde{\xi} \right)$ 大小难

以判断, 不利于 Lyapunov 稳定性分析, 故取 $\dot{\tilde{\Theta}} = \Gamma\phi(\hat{q}_{bit})\tilde{\xi}$, 并将上式化简为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{U}(\tilde{\xi}, \tilde{\theta}) = & -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{\xi}^2 - \left(\theta_1 + \frac{F_d}{M}\right) (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{\xi}^2 - 2\theta_1 q_{res} \tilde{\xi}^2 \end{aligned} \quad (36)$$

由于 $\theta_1 > 0, F_d/M > 0, q_{bit} > 0, \hat{q}_{bit} > 0$ 且 $q_{res} \geq 0$, 因此:

$$\left(\theta_1 + \frac{F_d}{M}\right) (q_{bit} + \hat{q}_{bit}) \tilde{\xi}^2 + 2\theta_1 q_{res} \tilde{\xi}^2 \geq 0 \quad (37)$$

又因为 $\frac{\beta_d}{V_d} > 0$, 则只需取 $l_1 > 0$ 即可得到:

$$\dot{U}(\tilde{\xi}, \tilde{\theta}) \leq -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{\xi}^2 \leq 0 \quad (38)$$

分析可知 $\tilde{\xi} = \tilde{\Theta} = 0$ 是由式 (33) 及 $\dot{\tilde{\Theta}} = \Gamma\phi(\hat{q}_{bit})\tilde{\xi}$ 定义的系统平衡点, 且关于 $(\tilde{\xi}, \tilde{\Theta})$ 的系统是局部 Lipschitz 的, 由 LaSalle-Yoshizawa 定理^[25] 可知, 当式 (38) 成立时, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} -l_1 \frac{\beta_d}{V_d} \tilde{\xi}^2 = 0 \quad (39)$$

其中 l_1, β_d, V_d 为常数, 式 (39) 可表示为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}^2 = 0$, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{q}_{bit} \rightarrow q_{bit}$. 因此, 当满足 $\dot{\tilde{\Theta}} = \Gamma\phi(\hat{q}_{bit})\tilde{\xi}$ 时, 由 Lyapunov 稳定性理论及 LaSalle-Yoshizawa 定理可知, 观测器误差收敛且系统状态稳定.

2.3 自适应律设计

由于观测器设计过程中 $\tilde{\xi}$ 未知, 自适应律不能直接使用, 为解决这一问题, 需要定义如下中间变量:

$$\sigma = \Theta + \eta(p_p, \hat{\xi}) \quad (40)$$

其中 $\eta(p_p, \hat{\xi})$ 是关于 p_p 和 $\hat{\xi}$ 的函数. Θ 为未知常数向量, $\dot{\Theta} = 0$.

对式 (40) 求导可得:

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \dot{p}_p + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} \quad (41)$$

将式 (23) 中 $\dot{p}_p$ 代入上式:

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \left(\frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - q_{bit}) \right) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} \quad (42)$$

取 $\dot{\sigma}$ 估计值可得:

$$\dot{\hat{\sigma}} = \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \left(\frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - \hat{q}_{bit}) \right) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} \quad (43)$$

基于上述推导, 考虑 $\Theta = \sigma - \eta(p_p, \hat{\xi})$, 计算估

计误差 $\dot{\tilde{\Theta}}$ 如下:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\Theta}} = \dot{\Theta} - \dot{\hat{\Theta}} = -\dot{\hat{\Theta}} = -\dot{\sigma} + \dot{\eta}(p_p, \hat{\xi}) = & - \left(\frac{\partial \eta}{\partial p_p} \left(\frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - \hat{q}_{bit}) \right) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} \right) \\ & + \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \dot{p}_p + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} = \frac{\beta_d}{V_d} \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \hat{\xi} \end{aligned} \quad (44)$$

将式 (44) 代入 $\dot{\tilde{\Theta}} = \Gamma\phi(\hat{q}_{bit})\tilde{\xi}$ 可得:

$$-\frac{\beta_d}{V_d} \frac{\partial \eta}{\partial p_p} = \Gamma\phi(\hat{q}_{bit}) = \Gamma \begin{bmatrix} \hat{q}_{bit}^2 \\ 2\hat{q}_{bit} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

对式 (45) 求积分可得:

$$\begin{aligned} \eta(p_p, \hat{\xi}) = & -\frac{1}{a_1} \int \Gamma\phi(\hat{\xi} - l_1 p_p) dp_p = \\ & \Gamma \begin{bmatrix} \frac{(\hat{\xi} - l_1 p_p)^3}{3l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, \frac{(\hat{\xi} - l_1 p_p)^2}{l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, -\frac{p_p}{\frac{\beta_d}{V_d}} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (46)$$

因此, 关于 $\eta(\hat{q}_{bit}, h_{bit})$ 的偏导数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial p_p} = -\frac{1}{\frac{\beta_d}{V_d}} \Gamma \left[(\hat{\xi} - l_1 p_p)^2, 2(\hat{\xi} - l_1 p_p), 1 \right]^T \\ \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} = \Gamma \left[\frac{(\hat{\xi} - l_1 p_p)^2}{l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, \frac{2(\hat{\xi} - l_1 p_p)}{l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, 0 \right]^T \end{cases} \quad (47)$$

设置初始条件如下:

$$\hat{\xi}(0) = \hat{q}_{bit}(0) + l_1 p_p(0) \quad (48)$$

$$\hat{\sigma}(0) = \hat{\Theta}(0) + \eta(p_p(0), \hat{\xi}(0)) \quad (49)$$

其中 $p_p(0)$ 已知, $\hat{q}_{bit}(0)$ 需根据现场实际参数及人工经验进行初步估计. 最后利用式 (48) 计算得出 $\hat{\xi}(0)$, 并通过式 (49) 得到 $\hat{\sigma}(0)$.

综上, 整理可得本文所设计的观测器及自适应律方程:

$$\begin{cases} \hat{p}_{bh} = p_p - F_d \left(\hat{q}_{bit} + \frac{\hat{\theta}_2}{\hat{\theta}_1} \right)^2 + \rho_d g h_{bit} \\ \dot{\hat{\xi}} = \frac{1}{M} (p_p - p_c - F_d \hat{q}_{bit}^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_{bit}) - \\ \quad \hat{\Theta}^T \phi(\hat{q}_{bit}) + l_1 \frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - \hat{q}_{bit}) \\ \hat{q}_{bit} = \hat{\xi} - l_1 p_p \\ \hat{\xi}(0) = \hat{q}_{bit}(0) + l_1 p_p(0) \end{cases} \quad (50)$$

$$\begin{cases} \hat{\Theta} = \hat{\sigma} - \eta(p_p, \hat{\xi}) \\ \dot{\hat{\sigma}} = \frac{\partial \eta}{\partial p_p} \left(\frac{\beta_d}{V_d} (q_{pump} - \hat{q}_{bit}) \right) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{\xi}} \dot{\hat{\xi}} \\ \eta(p_p, \hat{\xi}) = \Gamma \left[\frac{(\hat{\xi} - l_1 p_p)^3}{3l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, \frac{(\hat{\xi} - l_1 p_p)^2}{l_1 \frac{\beta_d}{V_d}}, -\frac{p_p}{\frac{\beta_d}{V_d}} \right]^T \\ \hat{\sigma}(0) = \hat{\Theta}(0) + \eta(p_p(0), \hat{\xi}(0)) \end{cases} \quad (51)$$

根据气液两相流简化模型, 利用坐标变换以及构造 Lyapunov 函数得到式 (50) 和 (51) 的观测器及自适应率方程. 由 Lyapunov 稳定性理论分析可知, 该自适应观测器能够一致渐近估计气侵发生时井下未知参数以及未知状态 (井底流量、井底压力).

3 仿真分析

针对已建立的气液两相流模型, 使用自适应观测器估计井下未知参数及状态, 仿真数据如表 1 所示^[27]:

表 1 钻井模型数据

参数	数值	参数	数值
V_d/m^3	28.2743	V_a/m^3	96.1327
β_d/MPa	1400	β_a/MPa	1400
$M_d/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-4})$	5.7296×10^8	$M_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-4})$	1.6852×10^8
$F_d/(\text{MPa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-6})$	16500	$F_a/(\text{MPa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-6})$	2080
$\rho_d/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1250	$\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1250
$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8	h_{bit}/m	2000
$q_{pump}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.01	$q_{back}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.008

首先假设井底已发生气侵, 设定气侵量 $q_{res} = 0.0001$. 井下未知参数的估计结果如图 1–图 3 所示, 井底流量和压力的估计结果如图 4–图 5 所示:

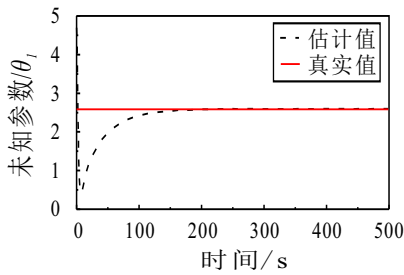


图 1 气侵工况下未知参数 θ_1 仿真结果

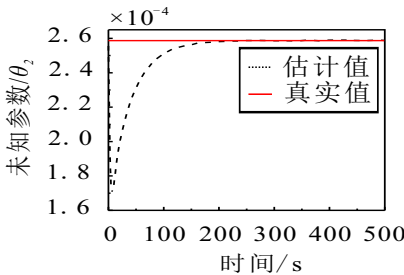


图 2 气侵工况下未知参数 θ_2 仿真结果

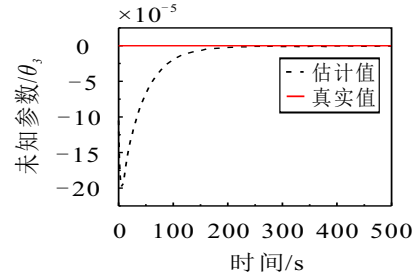


图 3 气侵工况下未知参数 θ_3 仿真结果

图 1–图 3 仿真结果表明: 当井底发生气侵时, 自适应观测器在 100s 内对未知参数 θ 估计的平均相对误差为 6.11%, 在 150s 内自适应观测器对未知参数 θ 估计的平均相对误差缩小至 1.31%, 同时在 200s 时收敛至未知参数的真实值.

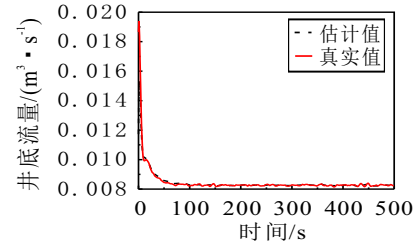


图 4 气侵工况下井底流量仿真结果

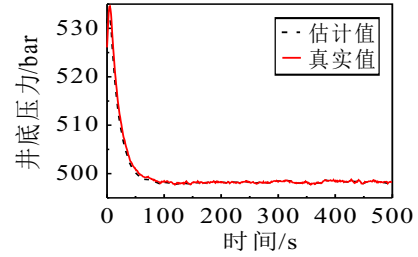


图 5 气侵工况下井底压力仿真结果

图 4–图 5 仿真结果表明: 当井底发生气侵时, 自适应观测器在 100s 内即可跟踪上井底流量及井底压力, 且后续观测几乎不受噪声扰动影响, 跟踪效果较好.

综合分析可知, 当井底发生气侵时, 本文所提自适应观测器可以在气侵工况下准确估计井下未知参数以及未知状态. 在实际钻井过程中, 准确判断气侵发生时间是提升控制效果的关键, 利用自适应观测器可以实时诊断井下工况, 为抑制气侵赢得宝贵时间, 进一步避免井涌、井喷等一系列恶性事故的发生.

假设在钻井过程中突然发生气侵, 气侵量 $q_{res} = 0.0001$, 观察气侵发生时井底流量和井底压力的变化, 仿真结果如图 6–图 7 所示.

仿真结果表明: 当钻井过程中突然发生气侵时, 井底压力呈先增大后减小的变化趋势, 压力稳定时出现动态波动的特点, 与文献 [29] 中气侵模拟的实验结果相同, 验证了本文所提气液两相流模型的有

效性. 同时, 自适应观测器能够在气侵发生后迅速跟踪井底流量以及井底压力, 且后续观测结果几乎不受扰动影响, 跟踪效果良好.

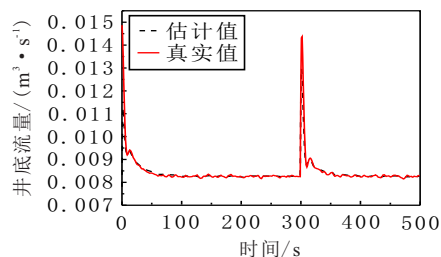


图6 钻井过程中发生气侵时井底流量仿真结果

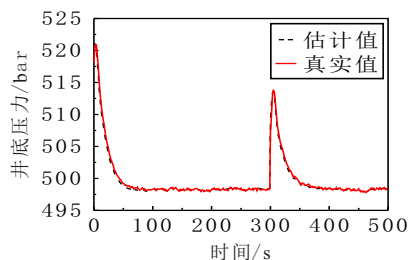


图7 钻井过程中发生气侵时井底压力仿真结果

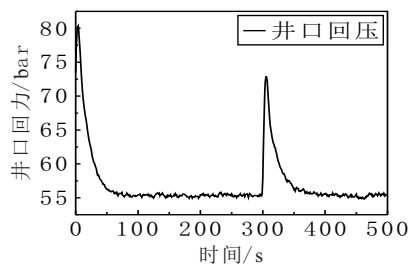


图8 钻井过程中发生气侵时井口回压仿真结果

此外, 在气侵发生后, 气侵量主要取决于井底压差, 为达到恒压钻井的目的, 井口回压应先用于平衡井底压差, 然后补偿气体滑脱产生的压降^[30]. 由图8的仿真结果可知, 气侵发生后, 井口回压的变化趋势为先增大后减小, 最后保持平稳, 进一步验证了本文方法的有效性.

使用文献[12]的方法估计气侵工况下钻井系统的主要状态参数, 仿真结果如图9–图10所示.

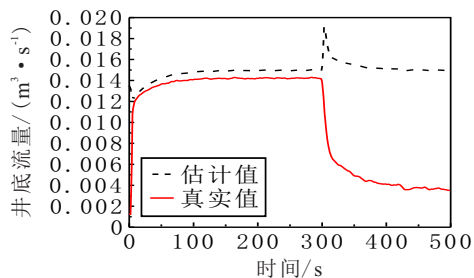


图9 单相水力学模型气侵工况下井底流量仿真结果

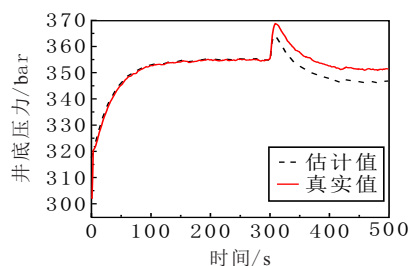


图10 单相水力学模型气侵工况下井底压力仿真结果

仿真结果表明, 在气侵发生前, 环空中无气相存在, 文献[12]所提单相水力学模型准确刻画了井底压力与井底流量的变化趋势, 其自适应观测器能够准确地估计井底流量与压力. 但是, 当仿真进行至300s时, 井下突然发生气侵, 环空流体从单相流转变为气液两相流, 文献[12]中提出的机理模型及观测器方法估计精度大大降低, 自适应观测器估计井底流量的平均相对误差达到了74.67%, 估计井底压力的平均相对误差为1.52%.

综上所述, 对井底已经气侵、钻井过程中突然发生气侵两种工况进行仿真分析. 当井底已经发生气侵时, 自适应观测器能够准确估计不确定参数, 并能快速且准确地估计井底流量及井底压力; 当钻井过程中突然发生气侵时, 自适应观测器仍然可以迅速准确地估计井下未知参数及未知状态, 并以此判断气侵是否发生.

4 结 论

本文首先对漂移通量模型所构建的PDE方程组进行简化, 建立了一种简化的ODE气液两相流模型. 其次, 根据该两相流模型设计了一种估计精度高、可靠性强的自适应观测器, 用于同时估计井下未知参数(环空摩擦积分)和未知状态(井底压力及井底流量), 并通过Lyapunov稳定性理论证明了观测器的收敛性. 仿真结果表明, 简化的两相流模型有效平衡了计算精度与模型复杂度, 准确反映了气液存在时井下变量的动态变化. 特别是在气侵发生时, 提出的自适应观测器可以实时准确地观测井底流量及压力变化, 为井下复杂事故诊断与监测方法提供了新的思路. 在未来工作中, 考虑修改气液两相流模型的假设条件, 将气体在环空中的运移过程进行精细化处理, 拓宽模型的适用范围, 兼顾开关井、循环排气等更多工况, 在限制模型复杂度的前提下更加接近实际钻井过程.

参考文献 (References)

- [1] 李根生, 吴文, 陈勉, 等. 深井复杂地层安全高效钻井基础研究[J]. 中国科技成果, 2014(13): 21-22.
(Li G S, Wu W, Chen M, et al. Basic research on safe and efficient drilling in deep complex formation[J]. China Science and Technology Achievements, 2014(13): 21-22.)
- [2] 韩成, 罗鸣, 杨玉豪, 等. 莺琼盆地高温高压窄安全密度窗口钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 568-572.
(Han C, Luo M, Yang Y H, et al. Key drilling technologies for HTHP wells with narrow safety density window in the Yingqiong Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(5): 568-572.)
- [3] 王江帅, 李军, 柳贡慧, 等. 变压力梯度下钻井环空压力预测[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 497-504.
(Wang J S, Li J, Liu G H, et al. Prediction of annulus pressure in variable pressure gradients drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 497-504.)
- [4] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1-25.
(Jiang X W. Drilling accidents and complications[M]. Beijing: Petroleum industry press, 2002: 1-25.)
- [5] 王杰, 李广, 朱晓东. 基于分层模糊推理的石油钻井事故预警系统[J]. 微计算机信息, 2008, 24(21): 177-178+184.
(Wang J, Li G, Zhu X D. Development of an Oil Drilling Accident Prewarning System Based on Hierarchical fuzzy inference[J]. Science and Technology & Innovation, 2008, 24(21): 177-178+184.)
- [6] Gravdal J E, Lorentzen R J, Fjelde K K, et al. Tuning of computer model parameters in managed-pressure drilling applications using an unscented-kalman-filter technique[J]. SPE Journal, 2010, 15(3): 856-866.
- [7] Zhou J, Stamnes O N, Aamo O M, et al. Observer-based control of a managed pressure drilling system[C]. 2008 Chinese Control and Decision Conference. Yantai: IEEE, 2008: 3475-3480.
- [8] Stamnes O N, Zhou J, Kaasa G O, et al. Adaptive observer design for the bottomhole pressure of a managed pressure drilling system[C]. 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun: IEEE, 2008: 2961-2966.
- [9] Zhou J, Stamnes O N, Aamo O M, et al. Switched control for pressure regulation and kick attenuation in a managed pressure drilling system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 19(2): 337-350.
- [10] 郑德建. 基于 L1 自适应算法的 MPD 井底压力控制[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 30-37.
(Zheng D J. Bottomhole Pressure Control of Managed Pressure Drilling Based on L1 Adaptive Algorithm[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018: 30-37.)
- [11] Stamnes O N, Aamo O M, Kaasa G O. Adaptive redesign of nonlinear observers[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(5): 1152-1157.
- [12] 徐宝昌, 孟宇, 刘伟. 控压钻井井下不可测变量的非线性估计[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1543-1549.
(Xu B C, Meng Y, Liu W. Nonlinear estimation of the down-hole unmeasurable variables in the managed pressure drilling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1543-1549.)
- [13] Musab H M, Imtiaz S, Khan F, et al. Early detection and estimation of kick in managed pressure drilling[J]. SPE Drilling & Completion, 2021, 36(2): 245-262.
- [14] Jiang H, Liu G, Li J, et al. Numerical simulation of a new early gas kick detection method using UKF estimation and GLRT[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2019(173): 415-425.
- [15] 王子振, 张辉, 舒腾飞, 等. 基于低频弹性波特征响应的油气钻井气侵井下监测模拟实验系统[J]. 力学与实践, 2022, 44(1): 51-58.
(Wang Z Z, Zhang H, Shu T F, et al. Experimental system for gas-kick downhole detection based on the characteristic response of low-frequency elastic wave in oil and gas drilling[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 51-58.)
- [16] 刘凤和, 程长坤, 谯世均, 等. 气侵初期环空压力瞬态变化规律研究[J]. 钻采工艺, 2022, 45(2): 1-7.
(Liu F H, Chen C K, Qiao S J, et al. Transient variation of annular pressure at the initial stage of gas influx[J]. Drilling and Production Technology, 2022, 45(2): 1-7.)
- [17] Liao Y, Sun X, Sun B, et al. Wellhead backpressure control strategies and outflow response characteristics for gas kick during managed pressure drilling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 75: 103164.
- [18] Gavriluk S L, Fabre J. Lagrangian coordinates for a drift-flux model of a gas-liquid mixture[J]. International journal of multiphase flow, 1996, 22(3): 453-460.
- [19] Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(4): 453-468.
- [20] Shi H, Holmes J A, Durlofsky L J, et al. Drift-flux modeling of two-phase flow in wellbores[J]. SPE Journal, 2005, 10(01): 24-33.
- [21] Sinègre L. Dynamic study of unstable phenomena stepping in gas-lift activated wells[J]. These Docteur de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [22] Wallis G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: Courier Dover Publications, 2020.
- [23] Aarsnes U J F, Meglio F D, Evje S, et al. Control-oriented drift-flux modeling of single and two-phase flow for drilling[C]. Dynamic Systems and Control Conference. Texas: American Society of Mechanical Engineers, 2014, 46209: V003T37A003.
- [24] Aarsnes U J F, Ambrus A, Vajargah A K, et al. A simplified gas-liquid flow model for kick mitigation and control during drilling operations[C]. Dynamic Systems and Control Conference. Columbus: American Society of Mechanical Engineers, 2015, 57250: V002T20A002.
- [25] Kaasa G O, Stamnes Ø N, Aamo O M, et al. Simplified

- hydraulics model used for intelligent estimation of downhole pressure for a managed-pressure-drilling control system[J]. SPE Drilling & Completion, 2012, 27(1): 127-138.
- [26] Tan Y, Kanellakopoulos I, Jiang Z P. Nonlinear observer/controller design for a class of nonlinear systems[C]. IEEE Conference on Decision & Control. Tampa: IEEE, 1998: 2503-2508.
- [27] Stamnes O N, Zhou J, Kaasa G O, et al. Adaptive observer design for the bottomhole pressure of a managed pressure drilling system[C]. 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun: IEEE, 2008: 2961-2966.
- [28] Sule I, Imtiaz S, Khan F, et al. Nonlinear model predictive control of gas kick in a managed pressure drilling system[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 1223-1235.
- [29] 徐朝阳, 孟英峰, 魏纳, 等. 气侵过程井筒压力演变规律实验和模型 [J]. 石油学报, 2015, 36(1): 7.
(Xu C Y, Meng Y F, Wei N, et al. Experimental simulation and numerical modeling of dynamic variations in wellbore pressure during gas-kicks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 7.)
- [30] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕. 控压钻井重力置换与溢流气侵判断准则分析 [J]. 应用力学学报, 2015, 32(2): 317-322+358.
(Kong X W, Ling Y H, Qui Y J. Research of mechanism for the gas invasion and gravity replacement in drilling operations[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(2): 317-322+358.)

作者简介

徐宝昌(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事控压钻井技术、钻井过程智能控制与协同优化的研究, E-mail: xbcyl@163.com;

孟卓然(1995—), 男, 博士研究生, 从事控压钻井过程建模、估计与控制的研究, E-mail: meng_zrcup8@163.com;

陈贻祺(2000—), 男, 博士研究生, 从事钻柱力学过程建模、估计与控制的研究, E-mail: chenqiqi_cup@163.com;

刘伟(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 从事钻井过程建模、优化决策与高端装备开发的研究, E-mail: liuweidri@cnpc.com.cn;

吴楠(1997—), 男, 硕士, 从事控压钻井过程建模、系统辨识与参数估计的研究, E-mail: 13121171017@163.com.