

控压钻井系统井下不确定参数与未知状态估计

徐宝昌[†], 吴楠, 孟卓然

(中国石油大学(北京)信息科学与工程学院, 北京 102249)

摘要: 针对控压钻井过程中井下信息获取难度大的问题, 本文设计了一种可以同时估计井下不确定参数与未知状态的自适应观测器. 首先, 针对未知状态中含有不确定参数的控压钻井系统, 提出了一种可解耦不确定参数的观测器匹配条件. 其次, 根据此观测器匹配条件设计自适应观测器估计井下参数与状态, 并通过李雅普诺夫稳定性理论证明了估计误差的渐近稳定性. 最后, 基于线性矩阵不等式方法求解观测器增益, 提高观测器的鲁棒性. 仿真分析表明: 与已有针对控压钻井系统设计的自适应观测器相比, 本文所设计的观测器对井下环空摩擦积分和井底流量的估计具有更好的收敛性以及鲁棒性.

关键词: 控压钻井系统; 不确定参数; 自适应观测器; 观测器匹配条件; 线性矩阵不等式

引用格式: 徐宝昌, 吴楠, 孟卓然. 控压钻井系统井下不确定参数与未知状态估计. 控制理论与应用, 2022, 39(8): 1561 – 1568

DOI: 10.7641/CTA.2021.10566

Estimation of downhole uncertain parameters and unknown state of managed pressure drilling

XU Bao-chang[†], WU Nan, MENG Zhuo-ran

(College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of obtaining downhole information in the process of managed pressure drilling, this paper designs an adaptive observer that can simultaneously estimate the downhole uncertain parameters and the unknown state. First of all, an observer matching condition that can decouple uncertain parameters is proposed for managed pressure drilling systems that contain uncertain parameters in the unknown state. Then, an adaptive observer is designed based on the observer matching condition to estimate downhole parameters and state, and the asymptotic stability of the estimation error is proved based on the Lyapunov stability theorem. Finally, the observer gain is obtained based on linear matrix inequality (LMI) method to improve the robustness of the observer. Simulation analysis shows that compared with the existing adaptive observer for managed pressure drilling system, the proposed observer has better convergence and robustness for the estimation of downhole annular friction integral and bottom-hole flow.

Key words: managed pressure drilling system; uncertain parameters; adaptive observer; observer matching condition; linear matrix inequality

Citation: XU Baochang, WU Nan, MENG Zhuoran. Estimation of downhole uncertain parameters and unknown state of managed pressure drilling. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1561 – 1568

1 引言

在深部复杂地层钻井过程中, 井下存在异常高压、易垮塌、漏失等复杂作业条件, 井底压力的安全窗口窄, 安全作业风险高^[1-2]. 同时, 近年来我国发现的特大型油气田均处于超过4500 m的深部复杂地层, 井下变量的测量受限于仪器性能, 可测信息少且传输速率低, 传统随钻测量所获取的井底压力需要数十秒才能

传至地面, 并且当工况迁移或存在未知干扰时, 井下部分重要参数丢失^[3-4]. 由于井下可测信息少且实时性差, 往往导致控制滞后, 进而影响钻井过程安全. 例如在塔里木库车山前高压盐水层、高压裂缝性地层等复杂地层钻井实践中, 因井底压力波动导致发生溢流、漏失的井数占总井数的25%以上, 年均损失数亿元^[5-6].

收稿日期: 2021-06-30; 录用日期: 2021-10-25.

[†]通信作者. E-mail: xbcyl@cup.edu.cn; Tel.: +86 10-89733962.

本文责任编辑: 龙离军.

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

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFA0708304) and the China National Petroleum Corporation-China University of Petroleum (Beijing) Strategic Cooperation Science and Technology Project (ZLZX2020-03).

在控压钻井(managed pressure drilling, MPD)系统中, 控制系统通常包括两部分: 1) 用于实时估计井下不确定参数及未知状态的水力学模型; 2) 通过节流阀调节井口回压的反馈控制算法. 其中水力学模型是决定MPD系统控制精度的主要因素, 然而由于井下工况复杂, 水力学模型中存在无法测量的参数与状态. 因此, 研究可靠的参数估计方法对MPD井下不确定信息进行实时估计, 对保证安全高效钻井具有重大意义.

动态系统参数不确定性和外部扰动可以看作系统的未知输入^[7-11], 学者们最初仅考虑抑制未知输入而对系统状态进行准确估计^[12-15], 在此基础上, 研究了未知状态和不确定参数同时估计的自适应观测器设计问题, 并针对非线性系统将自适应观测器大致分为联合状态参数观测器和自适应状态观测器两大类^[16-17]. 目前, 国内外学者对井下不确定参数和未知状态估计的观测器设计方法已经进行了一定的研究工作. Zhou等^[18-20]基于简化的水力学模型, 通过设计状态观测器, 估计钻头处流量和井底压力, 设计了井底压力非线性控制律. 该方法可以在线估计未知状态. 徐宝昌等^[21]以提前预判气侵工况为目标, 应用自适应观测器理论, 以实际立压、回压数据作为观测器输入, 对未知井底压力与井底流量进行估计. Habib等^[22-23]提出了一种基于无迹卡尔曼滤波和未知输入估计理论的观测器, 同时估计井底钻头流量和气侵, 并以此为依据检测与评估异常工况. Stamnes等^[24]利用Lyapunov分析和非线性坐标变换, 给出了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, 但构造这种自适应状态观测器的条件十分严格, 需要求解一个特定的偏微分方程组才能得到其更新率.

与基于观测器匹配条件构造观测器的方法不同, 现有研究成果大多是根据特殊的坐标变换方法构造自适应观测器, 其构造条件十分严格, 且难以应用于其他非线性系统. 因此, 本文针对MPD这类非线性系统, 提出一种从观测器匹配条件出发的观测器设计新方法. 观测器匹配条件于文献[25]中首次提到, 该条件对观测器设计中的不确定参数解耦具有重要意义, 基于此条件已出现了多种观测器设计方法^[17, 26-28]. 其中, 文献[26]针对存在不确定参数的线性和非线性Lipschitz系统, 讨论了当观测器增益和系统输入存在干扰时参数和状态的估计问题, 设计了非线性非脆弱比例积分滤波误差自适应观测器. 文献[27]针对常微分方程组中状态和参数值的渐近重构问题, 提出了一种参数化解决方案, 即将不确定参数作为状态和时间的非线性参数化函数. 文献[28]设计的自适应观测器可从稳定性证明中消除限制性耗散条件, 并将观测器增益求解问题转化为一个线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的可行性问题.

文献[26-28]方法的共同之处在于其非线性系统

结构都可以满足观测器匹配条件, 然而对MPD系统这类未知状态中含有不确定参数的非线性系统, 传统的观测器匹配条件并不能对其不确定参数进行解耦. 因此, 本文在学者Stamnes等人的研究成果^[24, 28]基础上, 针对钻井系统这类未知状态中含有不确定参数的非线性系统, 提出了一种新的自适应观测器设计方法. 该方法对传统观测器匹配条件进行改进, 使其能够对MPD系统中的不确定参数进行解耦. 并在此基础上, 用构造性方法设计了一种联合估计不确定参数和未知状态的自适应观测器, 证明了持续激励(persistent excitation, PE)条件下未知状态及不确定参数的全局渐近稳定. 最后, 基于LMI方法求解观测器增益, 优化了观测器设计过程, 并提高了系统鲁棒性. 仿真实验结果表明, 本文所提方法能够在MPD系统同时存在不确定参数与未知状态的情况下, 准确地估计井下不确定参数与未知状态, 且对井下环空摩擦积分和井底流量的估计具有更快的收敛速度以及较好的鲁棒性.

2 系统描述

本文采用的简化水力学模型, 井筒本身以及一系列钻井设备都包含在该模型中, 如钻井泵、钻杆、钻头、环空以及节流阀等, 如图1所示^[21].

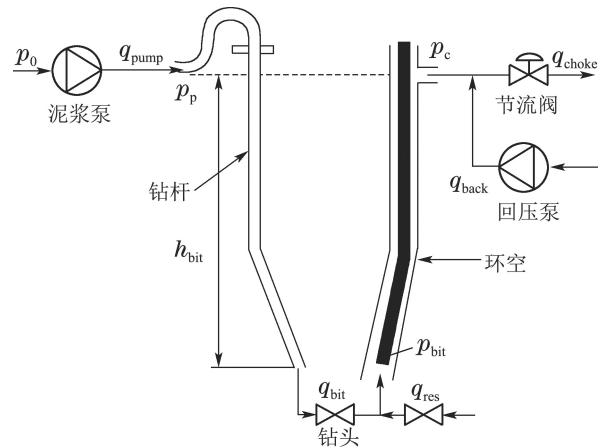


图1 控压钻井系统简化模型

Fig. 1 Managed pressure drilling system simplified model

该模型将井筒分为钻杆和环空2个独立的单元, 并通过钻头将这两个独立单元连接起来. 由质量守恒以及动量守恒定律, 钻井系统的数学模型可表示为^[18]:

$$\begin{cases} \dot{p}_p = \frac{\beta_d}{V_d}(q_{\text{pump}} - q_{\text{bit}}), \\ \dot{p}_c = \frac{\beta_a}{V_a}(q_{\text{bit}} + q_{\text{res}} + q_{\text{back}} - q_{\text{choke}}), \\ \dot{q}_{\text{bit}} = \frac{1}{M}[p_p - p_c - (F_a + F_d)q_{\text{bit}}^2 + (\rho_d - \rho_a)gh_{\text{bit}}], \end{cases} \quad (1)$$

其中: β_a, β_d 分别为环空和钻杆的体积模量; V_a, V_d 分别表示环空和钻杆体积; h_{bit} 为井深; ρ_a, ρ_d 分别代表环空和钻杆中的流体密度; M 为环空和钻杆内流动方

向上单位截面密度的积分; F_a, F_d 分别是环空和钻杆中摩擦积分; p_p 表示泥浆泵出口压力; p_c 为井口回压; q_{bit} 代表井底流量; $q_{pump}, q_{back}, q_{choke}$ 分别为泥浆泵出口流量、回压泵流量和节流阀出口流量; q_{res} 表示地层侵入流体流量. 注意式(1)中的 F_a, F_d, ρ_a, ρ_d 为难以获取准确数值的井下参数, q_{bit} 为未知的井下变量. 针对式(1)模型, 考虑如下形式的非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \Omega(y, u) + B\Phi(x) + E\Psi(x)\theta, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^p$ 分别表征系统状态、输入和输出; $\theta \in \mathbb{R}^r$ 为不确定参数; $\Omega(y, u) : \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ 为已知向量; $\Phi(x) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^s, \Psi(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{q \times r}$ 是未知的非线性函数向量; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times s}, E \in \mathbb{R}^{n \times q}$ 和 $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ 为已知常数矩阵. 此外, 假设 $\text{rank}(C) = p$ 且 $\text{rank}(E) = q$.

由于钻井系统中 F_a, ρ_a 和 ρ_d 为不确定参数, 所以可设 $\theta_1 = F_a/M, \theta_2 = (\rho_d - \rho_a)g/M$. 同时, 为了便于算法设计, 令 $x_1 = p_p, x_2 = p_c, x_3 = q_{bit}$, 则式(1)可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{\beta_d}{V_d}(q_{pump} - x_3), \\ \dot{x}_2 = \frac{\beta_a}{V_a}(x_3 + q_{res} + q_{back} - q_{choke}), \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{M}(x_1 - x_2) - \frac{F_d}{M}x_3^2 - \theta_1 x_3^2 + \theta_2, \\ y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)转换为如系统(2)结构, 可得

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\beta_d}{V_d} \\ 0 & 0 & \frac{\beta_a}{V_a} \\ \frac{1}{M} & 0 & -\frac{1}{M} \end{bmatrix},$$

$$E = B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \Phi(x) = -\frac{F_d}{M}x_3^2,$$

$$\Omega(y, u) = \begin{bmatrix} \frac{\beta_d}{V_d}q_{pump} \\ q_{res} + q_{back} - q_{choke} \\ 0 \end{bmatrix}, \Psi(x) = [-x_3^2 \quad 1].$$

假设 1 函数 $\Omega(y, u)$ 在其定义域上是连续的, $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)$ 关于 x 满足 Lipschitz 条件, 存在正实数 γ_1 和 γ_2 使下式成立:

$$\begin{cases} \|\Phi(x) - \Phi(\hat{x})\| \leq \gamma_1 \|x - \hat{x}\|, \\ \|\Psi(x) - \Psi(\hat{x})\| \leq \gamma_2 \|x - \hat{x}\|. \end{cases} \quad (4)$$

假设 2 不确定参数 θ 为有界常数, 存在已知正实数 γ_3 使下式成立:

$$\|\theta\| \leq \gamma_3. \quad (5)$$

注 1 需要指出的是, 假设 1 的应用取决于式(4)的 Lipschitz 条件是局部还是全局地满足. 文献[29]中指出任何 $\dot{x} = f(x, u)$ 形式的系统, 如果对 x 连续可微, 其结构都可以表示为线性部分加上非线性部分, 且至少在局部满足 Lipschitz 条件.

引理 1^[30] 存在矩阵 $P = P^T > 0$ 及 F 使得等式 $E^T P = FC$ 成立, 当且仅当

$$\text{rank}(CE) = \text{rank}(E), \quad (6)$$

式(6)即观测器匹配条件, 表示 $\text{rank}(E) < \text{rank}(C)$, 即 $q < p$. 对于大多数情况下的非线性系统(2), 满足观测器匹配条件意味着向量 $\Psi(x)\theta$ 的所有项, 包括不确定参数, 至少在 q 个可测状态中显式出现. 该条件可通过对系统(2)中的输出 y 的一阶导数来理解:

$$\dot{y} = C(Ax + \Omega(y, u) + B\Phi(x)) + CE\Psi(x)\theta. \quad (7)$$

由式(7)可知, 如果满足观测器匹配条件, 系统(2)和式(7)中 $\Psi(x)\theta$ 的系数矩阵具有相同的秩, 即系统(2)中出现的 $\Psi(x)\theta$ 的所有项也会出现在式(7)中.

然而对于一些类似本文 MPD 系统的非线性系统, 容易验证其结构不能满足观测器匹配条件. 因此, 传统的自适应状态观测器在这些系统中是不可实现的. 本文的目的在于, 提出一种新的观测器构造方法, 即对原有观测器匹配条件进行改造, 使其被一些不满足观测器匹配条件的系统所满足.

3 自适应观测器设计及收敛性分析

本节针对不确定参数存在于未知状态的系统(2), 提出了一种新的自适应观测器设计方法. 与传统的自适应观测器设计一样, 该方法将不确定参数与测量输出的关系表述为矩阵等式, 并在此基础上构造自适应观测器.

3.1 自适应观测器设计

为了更好的表述系统(2)的结构以及构造自适应观测器, 提出如下假设.

假设 3 矩阵 A, B, C 和 E 满足

$$C[B \ E] = [0_{p \times s} \ 0_{p \times q}], \quad (8)$$

$$\text{rank}(CAE) = \text{rank}(E). \quad (9)$$

从相对阶的角度来看, 式(8)意味着从输出到 $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)\theta$ 的相对阶至少为 2, 即不确定项不直接存在可测输出中, 需要对输出求两次导数才能得到关于 $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)\theta$ 的表达式. 式(9)则是在常规观测器匹配条件的基础上进行了改造, 其表示 $\text{rank}(E) \leq \text{rank}(C)$, 即 $q \leq p$.

注 2 文献[24]以一种特殊的标准形式考虑了一类非线性系统, 其不确定参数和未知非线性项存在于未知状态中. 不同于假设 3 中通过相对阶来确定不确定参数位置的方式, 文

献[24]中的标准形式并没有将不确定项相对于输出的精确位置表示出来. 然而, 对于文献[24, 28]中的系统, 可以很容易的验证其结构满足假设3.

当系统满足假设3时, 可提出如下引理.

引理 2 由 $CE=0_{p \times q}$, $\text{rank}(CAE) = \text{rank}(E)$ 可得, 存在矩阵 $P = P^T > 0$, H 以及 G 使得

$$HCA - GC = E^T P. \quad (10)$$

证 首先将矩阵 C, E 写为如下形式:

$$C = [C_1 \ C_2], \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix},$$

其中: $C_1 \in \mathbb{R}^{p \times p}$, $E_1 \in \mathbb{R}^{p \times q}$. 不失一般性地假设 C_1 满秩. 提出如下非奇异矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ 0_{(n-p) \times p} & I_{(n-p)} \end{bmatrix}.$$

定义结构变换 $x = T^{-1}z$, 系统(2)转换为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z} = TAT^{-1}z + T\Omega(y, u) + \\ \quad TB\Phi(T^{-1}z) + TE\Psi(T^{-1}z)\theta, \\ y = CT^{-1}z, \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad z_1 = y, \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} C_1^{-1} & -C_1^{-1}C_2 \\ 0_{(n-p) \times p} & I_{(n-p)} \end{bmatrix},$$

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad TE = \begin{bmatrix} 0_{p \times q} \\ E_2 \end{bmatrix},$$

$$CT^{-1} = [I_{p \times p} \ 0_{p \times (n-p)}].$$

将式(9)应用于系统(11)可得

$$\text{rank}([CT^{-1}][TAT^{-1}][TE]) = \text{rank}(TE), \quad (12)$$

其中: CT^{-1} 相当于式(9)中的 C 阵, TAT^{-1} 相当于式(9)中的 A 阵, TE 相当于式(9)中的 E 阵. 将式(11)再次化简后可得 $\text{rank}(A_{12}E_2) = \text{rank}(E_2)$.

同时, 根据引理1可知, 当 $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$ 时, 有 $E^T P = FC$, 所以令 $P = P_3$, $H = F$, 可得 $E_2^T P_3 = HA_{12}$.

最后, 将式(10)应用于系统(11)可得

$$H[CT^{-1}][TAT^{-1}] - G[CT^{-1}] = [TE]^T [(T^T)^{-1} P T^{-1}], \quad (13)$$

其中: $(T^T)^{-1} P T^{-1} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_2^T & P_3 \end{bmatrix}$ 为正定对称矩阵, 将矩阵 TAT^{-1}, CT^{-1}, TE 的值代入式(13)中可得 $[HA_{11} - G \ HA_{12}] = [E_2^T P_2^T \ E_2^T P_3]$. 由于 $E_2^T P_3 = HA_{12}$, 所以只需令 $G = HA_{11} - E_2^T P_2^T$, 即可得到 $HCA - GC = E^T P$. 证毕.

对满足引理1的非线性系统(2), 一种经典的自适

应观测器设计形式如下^[28, 31-32]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + \Omega(y, u) + B\Phi(\hat{x}) + E\Psi(\hat{x})\hat{\theta} + \\ & \quad L(y - C\hat{x}), \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \rho^{-1} \Psi^T(\hat{x}) FC(x - \hat{x}), \quad (14b)$$

其中: $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为观测器增益, ρ 是正常数, $F \in \mathbb{R}^{q \times p}$ 为待定的常数增益矩阵. 然而, 当非线性系统不满足引理1时, 无法使用增益矩阵 F 来构造观测器.

基于上述考虑, 对于满足假设1-3的系统(2), 利用引理2中的矩阵 H 来替代引理1中的增益矩阵 F , 并引入一个中间变量 W 用于表示不确定参数 θ 的估计值. 设计如下形式的类Luenberger观测器来进行状态和参数估计:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + \Omega(y, u) + B\Phi(\hat{x}) + \\ & \quad E\Psi(\hat{x})\hat{\theta} + L(y - C\hat{x}), \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = W + \Gamma \Psi^T(\hat{x}) Hy, \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} \dot{W} &= -\Gamma \frac{d\Psi^T(\hat{x})}{dt} Hy - \Gamma \Psi^T(\hat{x}) (HC(A\hat{x} + \\ & \quad \Omega(y, u) + B\Phi(x) + E\Psi(x)\theta) + \\ & \quad G(y - C\hat{x})), \end{aligned} \quad (15c)$$

其中: H, G 为待定的常数增益矩阵, $\Gamma = \Gamma^T > 0$ 是人为给定的增益矩阵.

注 3 式(15c)中的 $\frac{d\Psi^T(\hat{x})}{dt}$ 可通过链式法则 $\frac{\partial \Psi^T(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \dot{\hat{x}}$ 得到, 并且由于已经假设 $\Psi(x)$ 是Lipschitz的, 所以 $\frac{\partial \Psi^T(\hat{x})}{\partial \hat{x}}$ 存在且有界.

3.2 收敛性分析

观测器(15)的收敛性证明需要基于如下引理及推论.

引理 3 (Barbalat引理)^[33] 如果对于 $t > 0$, $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ 是一致连续的, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t f(\tau) d\tau$ 存在且有界, 那么 $\lim_{t \rightarrow \infty} f(\tau) = 0$.

推论 1 如果 $f \in L_2 \cap L_\infty$, 且 \dot{f} 有界, 那么

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(\tau) = 0.$$

定理 1 考虑系统(2)及观测器(15), 在满足假设1-3的情况下, 如果存在正实数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和矩阵 $P = P^T > 0, H, G$ 使得式(16)及式(17)成立, 那么 $E\Psi(\hat{x})\hat{\theta}$ 收敛于 $E\Psi(x)\theta$, 状态的估计值 \hat{x} 渐近收敛至真实值 x :

$$(A - LC)^T P + P(A - LC) + \varepsilon_1 P B B^T P + \varepsilon_2 P E E^T P + \varepsilon_1^{-1} \gamma_1^2 I_n + \varepsilon_2^{-1} \gamma_2^2 \rho^2 I_n < 0, \quad (16)$$

$$HCA - GC = E^T P. \quad (17)$$

此外, 如果 $E\Psi(x)$ 满足PE条件, $\hat{\theta}$ 收敛于 θ .

证 令 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 及 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 并注意到 $\dot{\tilde{\theta}} = 0$. 结

合系统(2)及式(14)可得

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} + B\tilde{\Phi} + E(\tilde{\Psi}\theta + \Psi(\hat{x})\tilde{\theta}), \quad (18)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\Gamma\Psi^T(\hat{x})(HCA - GC)\tilde{x}, \quad (19)$$

其中: $\tilde{\Phi} = \Phi(x) - \Phi(\hat{x}), \tilde{\Psi} = \Psi(x) - \Psi(\hat{x})$.

考虑如下Lyapunov函数:

$$V = \tilde{x}^T P\tilde{x} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1}\tilde{\theta}. \quad (20)$$

对式(20)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \tilde{x}^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)]\tilde{x} + \\ & 2\tilde{x}^T PB\tilde{\Phi} + 2\tilde{x}^T PE\tilde{\Psi}\theta + \\ & 2\tilde{x}^T PE\Psi(\hat{x})\tilde{\theta} - 2\tilde{\theta}^T \Psi^T(\hat{x})(HCA - GC)\tilde{x}. \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $HCA - GC = E^T P$, 所以

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \tilde{x}^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)]\tilde{x} + \\ & 2\tilde{x}^T PB\tilde{\Phi} + 2\tilde{x}^T PE\tilde{\Psi}\theta + 2\tilde{x}^T PE\Psi(\hat{x})\tilde{\theta}. \end{aligned} \quad (22)$$

由杨氏不等式 $2v^T w \leq \varepsilon v^T v + \varepsilon^{-1} w^T w (\varepsilon > 0)$, 以及假设条件1-2可得

$$\begin{aligned} 2\tilde{x}^T PB\tilde{\Phi} \leq & \varepsilon_1 \tilde{x}^T PBB^T P\tilde{x} + \varepsilon_1^{-1} \tilde{\Phi}^T \tilde{\Phi} \leq \\ & \varepsilon_1 \tilde{x}^T PBB^T P\tilde{x} + \varepsilon_1^{-1} \tilde{x}^T \gamma_1^2 \tilde{x}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} 2\tilde{x}^T PE\tilde{\Psi}\theta \leq & \varepsilon_2 \tilde{x}^T PEE^T P\tilde{x} + \varepsilon_2^{-1} \theta^T \tilde{\Psi}^T \tilde{\Psi} \theta \leq \\ & \varepsilon_2 \tilde{x}^T PEE^T P\tilde{x} + \varepsilon_2^{-1} \tilde{x}^T \gamma_2^2 \gamma_3^2 \tilde{x}, \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为人为给定的正实数.

由Lyapunov稳定性理论可知, 当 $\dot{V} \leq -\tilde{x}^T Q\tilde{x}$, 且 Q 正定时, \tilde{x} 和 $\tilde{\theta}$ 有界. 其中

$$Q = -((A - LC)^T P + P(A - LC) + \varepsilon_1 PBB^T P + \varepsilon_2 PEE^T P + \varepsilon_1^{-1} \gamma_1^2 I_n + \varepsilon_2^{-1} \gamma_2^2 \gamma_3^2 I_n). \quad (25)$$

进一步, \tilde{x} 和 $\tilde{\theta}$ 的渐近稳定性可以通过对 $\dot{\tilde{x}}$ 的讨论证明.

首先, 对 $\dot{V} \leq -\tilde{x}^T Q\tilde{x}$ 从 $t = 0$ 到 $t = t_f$ 积分可得

$$V(t_f) \leq V(0) - \int_0^{t_f} \tilde{x}^T Q\tilde{x} dt. \quad (26)$$

因为 $V(t) \geq 0$ 且有界, Q 正定, 由式(26)可知 $\tilde{x} \in L_2$. 结合Lyapunov稳定性理论分析可知, $\tilde{x} \in L_\infty \cap L_2$. 同时, 由于 $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)$ 是Lipschitz的, 通过式(18)结合上述分析可得 $\dot{\tilde{x}} \in L_\infty$. 因此, $\tilde{x} \in L_\infty \cap L_2$ 且 $\dot{\tilde{x}} \in L_\infty$, 根据推论1可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x} = 0$.

此外, 为证明参数估计误差 $\tilde{\theta}$ 的渐近稳定性, 首先需要证明 $\dot{\tilde{x}}$ 的一致连续性.

由于式(18)右侧 $\dot{\tilde{x}} \in L_\infty$ 且 $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)$ 是Lipschitz的, 可以直接证明式(18)右侧的前3项是一致连续的. 同时, 由式(15a)及式(19)可知 $\dot{\tilde{x}} \in L_\infty$ 且 $\dot{\tilde{\theta}} \in L_\infty$, 因此式(18)右侧的第4项也是一致连续的. 综上分析可知 $\dot{\tilde{x}}$ 是一致连续的.

对 $\dot{\tilde{x}}$ 积分可得 $\int_0^\infty \dot{\tilde{x}} dt = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) - \tilde{x}(0) = -\tilde{x}(0)$ 有界, 根据引理3可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{x}} = 0$.

最后, 由式(18)可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} E\tilde{\Psi}\tilde{\theta} = 0$, 并且当 $E\tilde{\Psi}$ 满足PE条件时, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0$ ^[31]. 证毕.

上述定理在保证观测误差收敛的条件下, 亦给出了观测器增益矩阵的设计方法. 为了便于求解增益矩阵, 令 $L = P^{-1}M$, 其中 $M \in \mathbb{R}^{n \times p}$, 根据Schur补性质^[34]可将增益矩阵的求解问题表示为如下LMI形式:

$$\begin{bmatrix} \Lambda & PB & PE \\ B^T P & -\varepsilon_1^{-1} I_s & 0_{s \times q} \\ E^T P & 0_{q \times s} & -\varepsilon_2^{-1} I_q \end{bmatrix} < 0, \quad (27)$$

其中 $\Lambda = A^T P + PA - C^T M^T - MC + \varepsilon_1^{-1} \gamma_1^2 I_n + \varepsilon_2^{-1} \gamma_2^2 \gamma_3^2 I_n$.

同时, 基于文献[35]中的理论, 式(10)的求解问题可以转化为下面的LMI优化问题:

$$\begin{bmatrix} \eta I_q & HCA - GC - E^T P \\ (HCA - GC - E^T P)^T & \eta I_n \end{bmatrix} \geq 0, \quad (28)$$

其中: η 为一个正的标量, 求解式(28)需使 η 最小化. 同时求解线性矩阵不等式(27)和式(28)即可得到矩阵 H, G 和 P .

将提出的自适应观测器设计方法总结为如下步骤:

步骤 1 假设系统中未知函数 $\Phi(x)$ 和 $\Psi(x)$ 在其定义域上满足局部Lipschitz条件, 并根据其定义域取Lipschitz常数 γ_1, γ_2 ;

步骤 2 根据不确定参数 θ 的取值范围设定Lipschitz常数 γ_3 ;

步骤 3 利用引理2中矩阵 H, G 的性质, 设计观测器(15)中的参数估计方程 $\dot{\hat{\theta}} = W + \Gamma\Psi^T(\hat{x})Hy$;

步骤 4 通过LMI求解矩阵 H, G, M 和 P , 并根据 $L = P^{-1}M$ 计算出观测器增益矩阵 L ;

步骤 5 设定仿真模型初始条件, 利用步骤4计算出的矩阵参数, 使用观测器(15)估计 x 和 θ .

4 仿真分析

为验证本文所提出自适应观测器的有效性, 本节给出了基于MPD模型(1)的仿真结果. 仿真中的模型参数与初始条件设置均与文献[18]中实验平台的参数相同, 模型参数如表1所示.

仿真MPD模型的初始状态设置为 $p_p(0) = 12 \text{ MPa}$, $p_c(0) = 70 \text{ MPa}$, $\hat{q}_{\text{bit}}(0) = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$; 不确定参数初值设置为 $\hat{\theta}_1(0) = 2.2$, $\hat{\theta}_2(0) = 2.62$; 其他参数设置为 $\Gamma = \begin{bmatrix} 7 \times 10^5 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^3 \end{bmatrix}$.

考虑假设1, 由于函数 $\Phi(x)$ 及 $\Psi(x)$ 在其定义域上是Lipschitz的, 可取Lipschitz常数 $\gamma_1 = 0.8$, $\gamma_2 = 0.05$.

同时,由 $\theta_1 = F_a/M, \theta_2 = (\rho_d - \rho_a)g/M$, 设 $\theta_1 \in [0, 5], \theta_2 \in [0, 5]$, 结合假设2可得Lipschitz常数 $\gamma_3 = 7.07$. 最后,取 $\varepsilon_1 = 50, \varepsilon_2 = 50$, 利用式(27)–(28)计算观测器增益及相关参数可得

$$P = \begin{bmatrix} 1.763 & 0.800 & -0.058 \\ 0.800 & 1.579 & -0.237 \\ -0.058 & -0.237 & 1.583 \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} 527.772 & -6.981 \\ -812.349 & 238.899 \\ -6.981 & 506.081 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.800 \\ 0.237 \end{bmatrix}^T, H = \begin{bmatrix} -2.933 \\ 0.863 \end{bmatrix}^T \times 10^{-3},$$

$$\eta = 4.816 \times 10^{-10}, L = \begin{bmatrix} 697.406 & -110.618 \\ -885.029 & 260.625 \\ -111.196 & 354.571 \end{bmatrix}.$$

表1 钻井数据
Table 1 Drilling data

参数	数值	参数	数值
V_d/m^3	28.27	V_a/m^3	96.13
β_d/MPa	1400	β_a/MPa	1400
$M_d/(kg \cdot m^{-3})$	5.73×10^8	$M_a/(kg \cdot m^{-3})$	1.68×10^8
$F_d/(MPa \cdot s^2 \cdot m^{-6})$	16500	$F_a/(MPa \cdot s^2 \cdot m^{-6})$	2080
$\rho_d/(kg \cdot m^{-3})$	1250	$\rho_a/(kg \cdot m^{-3})$	1250
$g/(m \cdot s^{-2})$	9.8	h_{bit}/m	2000
$q_{pump}/(m^3 \cdot s^{-1})$	0.014	$q_{back}/(m^3 \cdot s^{-1})$	0.003

由于实际控压钻井过程中控制输入 $\Omega(y, u)$ 决定输出中的井口回压, 考虑当输入 $\Omega(y, u)$ 存在均值为0方差为1的噪声时进行仿真, 仿真结果如图2–5所示. 图2为泥浆泵出口压力、井口回压和井底流量3个状态的估计值和真实值, 图3为井底流量的估计误差, 图4为不确定参数的估计值和真实值, 图5为不确定参数的估计误差. 从图2和图3可以看出, 本文所提的自适应观测器可以保证井底流量的估计值在5s内收敛到真实值, 并在整个仿真过程中表现出了良好跟踪性能. 从图4及图5可看出, 本文方法能够在5s内实现对系统中不确定参数的准确估计.

文献[21]中, 自适应观测器的增益矩阵需要人为给出, 繁琐的调节过程限制了该方法在实际钻井过程的应用. 本文所提出观测器的增益矩阵则依赖于LMI求解, 因此当MPD系统建模存在误差而增益矩阵不变时, 分析观测器的鲁棒性可检验本文方法是否具有实际意义.

实际控压过程中, 由于雷诺系数 Re 的取值变化影响 F_d , 而造成建模误差^[21]. 本文模型中 Re 取值为 2×10^5 , 而实际控压钻井过程中 Re 的变化范围为 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^5$, 假设由于 Re 取值不准导致建模参数 F_d 存在20%误差, 取同样的观测器增益矩阵进行仿真,

观测效果如图6–7所示. 可以看到, 当 F_d 存在20%误差时, 本文设计的自适应观测器对 θ_1 的估计有一定误差, 但仍能准确的估计井底流量以及 θ_2 . 其原因是参数 θ_1 和 F_d 在MPD系统中都是作为井底流量的系数, 具有相同的作用. 因此, 当 F_d 存在误差时, 观测器可以通过调整 θ_1 的估计值来保证井底流量及 θ_2 估计的准确性, 即具有较好的鲁棒性.

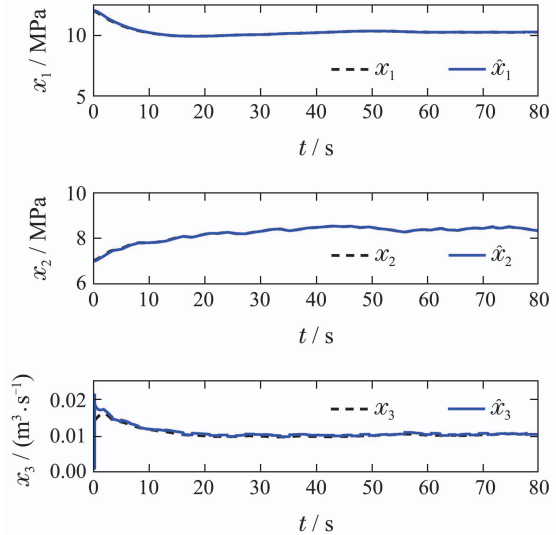


图2 状态估计值和真实值
Fig. 2 State estimates and true values

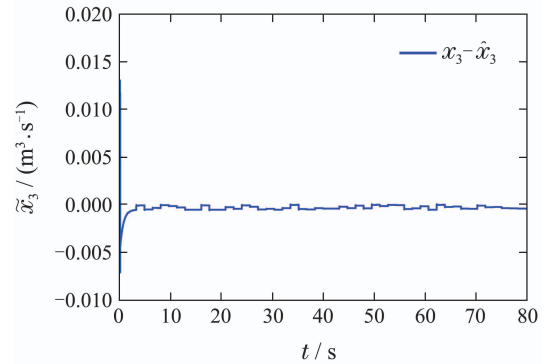


图3 井底流量估计误差
Fig. 3 Bottom-hole flow estimation error

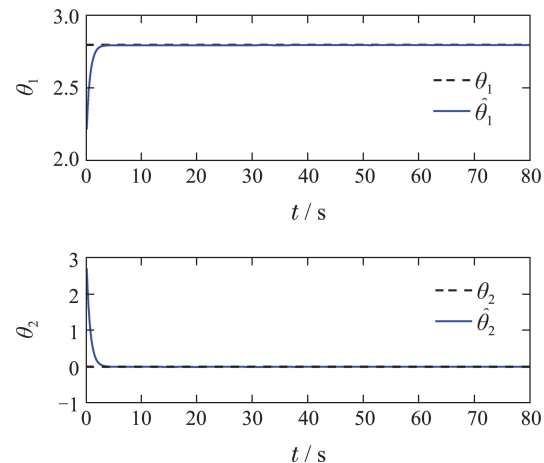


图4 不确定参数估计值和真实值
Fig. 4 Uncertain parameter estimates and true values

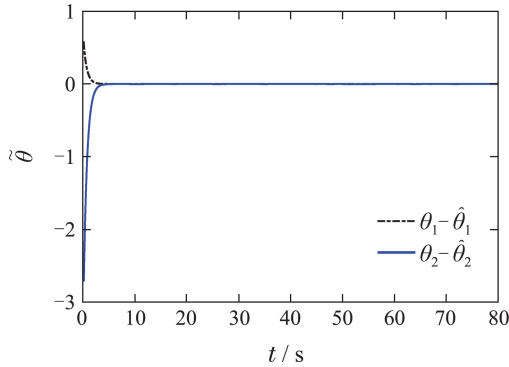


图 5 不确定参数估计误差

Fig. 5 Uncertain parameter estimation errors

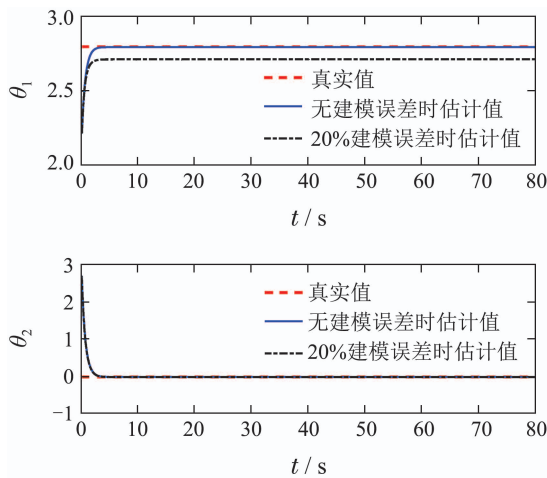


图 6 不确定参数估计值和真实值

Fig. 6 Uncertain parameter estimates and true values

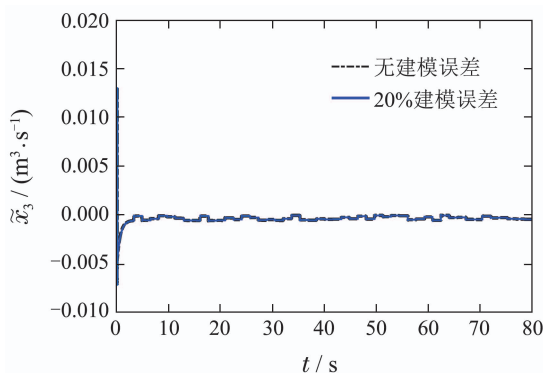


图 7 井底流量估计误差

Fig. 7 Bottom-hole flow estimation error

此外,为了证明本文方法的优越性,与文献[21]中构造坐标变换设计自适应观测器的方法进行了比较分析.在同样的模型参数及初始条件下,文献[21]的仿真结果如图8-9所示.与图2-5对比可知,本文方法在10 s内即可令不确定参数和未知状态迅速收敛至真实值,而文献[21]方法中不确定参数和未知状态收敛至真实值的时间均超过100 s.可见,本文在观测器增益矩阵上的设计优于文献[21]中人为给定观测器增益的方法,在收敛速度上具有明显的优势.

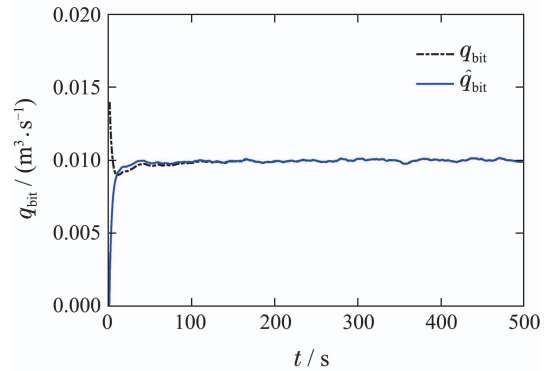


图 8 已有方法对井底流量的估计效果

Fig. 8 Estimation effect of existing methods on bottom-hole flow

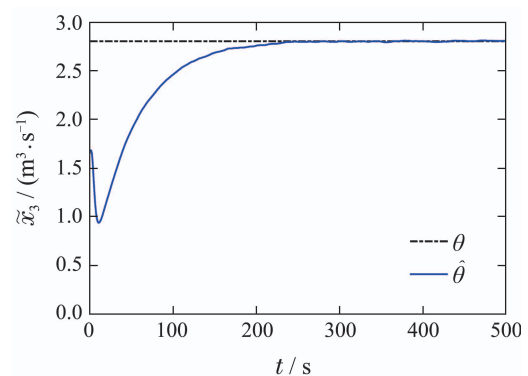


图 9 已有方法对不确定参数的估计效果

Fig. 9 Estimation effects of existing methods on unknown parameters

5 结论

本文针对控压钻井系统这类未知状态中含有不确定参数的非线性系统,提出了一种基于新的观测器匹配条件的自适应观测器设计方法,用于处理传统观测器匹配条件不满足时的不确定参数和未知状态同时估计的问题.文中通过Lyapunov稳定性理论证明了系统状态和参数的渐近稳定性,并将观测器增益计算问题转化为LMI优化问题.仿真实验表明,本文方法能够快速且精确地跟踪系统不确定参数以及未知状态.

参考文献:

- [1] HAN Cheng, LUO Ming, YANG Yuhao, et al. Key drilling technologies for HTHP wells with narrow safety density window in the Yingqiong Basin. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 568 – 572.
(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. *石油钻采工艺*, 2019, 41(5): 568 – 572.)
- [2] WANG Jiangshuai, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Prediction of annulus pressure in variable pressure gradients drilling. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 497 – 504.
(王江帅, 李军, 柳贡慧, 等. 变压力梯度下钻井环空压力预测. *石油学报*, 2020, 41(4): 497 – 504.)
- [3] PENG Liexin, LIU Ke, GAO Wenkai, et al. Data compression method based on resistivity imaging logging while drilling. *Well Logging Technology*, 2020, 44(3): 241 – 244.
(彭烈新, 刘珂, 高文凯, 等. 基于随钻电阻率成像测井的数据压缩方法. *测井技术*, 2020, 44(3): 241 – 244.)

- [4] ZHANG Yanghong. *Technological research and application for mwd mud pulse signals recognition*. Shandong: China University of Petroleum (EastChina), 2016.
(张洋弘. 随钻泥浆脉冲信号识别技术研究与应用. 山东: 中国石油大学(华东), 2016.)
- [5] ZHOU Jian, JIA Hongjun, LIU Yongwang, et al. Research on safe drilling technology for ultra deep ultrahigh pressure daltwater zones in piedmont area, Kuche. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(1): 54 – 59.
(周健, 贾红军, 刘永旺, 等. 库车山前超深超高压盐水层安全钻井技术探索. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 54 – 59.)
- [6] LIU Wei, ZHOU Yingcao, SHI Xitian, et al. Precise managed pressure drilling technology for ultra-high pressure brine layer in the Kuqa piedmont of the Tarim oilfield. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 23 – 28.
(刘伟, 周英操, 石希天, 等. 塔里木油田库车山前超高压盐水层精细控压钻井技术. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 23 – 28.)
- [7] NG M K Y, TAN C P, OETOMO D. Disturbance decoupled fault reconstruction using cascaded sliding mode observers. *Automatica*, 2012, 48(5): 794 – 799.
- [8] MENON P P, EDWARDS C. A sliding mode observer for monitoring and fault estimation in a network of dynamical systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(17): 2669 – 2685.
- [9] LIU Cong, LI Yinghui, ZHU Xihua, et al. Adaptive sliding-mode observer for actuator fault reconstruction in nonlinear system with mismatched uncertainties. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(4): 431 – 437.
(刘聪, 李颖晖, 朱喜华, 等. 基于自适应滑模观测器的不匹配非线性系统执行器故障重构. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 431 – 437.)
- [10] YANG Junqi, ZHU Fanglai. Linear-matrix-inequality observer design of nonlinear systems with unknown input and measurement noise reconstruction. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(4): 538 – 544.
(杨俊起, 朱芳来. 未知输入和可测噪声重构之线性矩阵不等式非线性系统观测器设计. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 538 – 544.)
- [11] ZHANG Jiancheng, ZHU Fanglai. Linear system unknown input observer design when the observer matching condition is not satisfied. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 441 – 448.
(张建成, 朱芳来. 匹配条件不满足时线性系统未知输入观测器设计. 控制理论与应用, 2017, 34(4): 441 – 448.)
- [12] WANG S, DAVISON E J, DORATO P. Observing the states of systems with unmeasurable disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1975, 20(5): 716 – 717.
- [13] BHATTACHARYYA S. Observer design for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1978, 23(3): 483 – 484.
- [14] HOSTETTER G, MEDITCH J. Observing systems with unmeasurable inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1973, 18(3): 307 – 308.
- [15] PANUSKA V. A new form of the extended Kalman filter for parameter estimation in linear systems with correlated noise. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(2): 229 – 235.
- [16] BESANCON G. Parameter/fault estimation in nonlinear systems and adaptive observers. *Nonlinear Observers and Applications*. New York: Springer, 2007: 211 – 222.
- [17] EKRAMIAN M, SHEIKHOLESLAM F, HOSSEONNIA S, et al. Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 2013, 62(4): 319 – 323.
- [18] ZHOU J, STAMNES O N, AAMO O M, et al. Observer-based control of a managed pressure drilling system. *2008 Chinese Control and Decision Conference*. Yantai: IEEE, 2008: 3475 – 3480.
- [19] STAMNES O N, ZHOU J, KAASA G O, et al. Adaptive observer design for the bottomhole pressure of a managed pressure drilling system. *2008 47th IEEE Conference on Decision and Control*. Cancun: IEEE, 2008: 2961 – 2966.
- [20] ZHOU J, STAMNES O N, AAMO O M, et al. Switched control for pressure regulation and kick attenuation in a managed pressure drilling system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 19(2): 337 – 350.
- [21] XU Baochang, MENG Yu, LIU Wei. Nonlinear estimation of the down-hole unmeasurable variables in the managed pressure drilling system. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1543 – 1549.
(徐宝昌, 孟宇, 刘伟. 控压钻井井下不可测量变量的非线性估计. 石油学报, 2016, 37(12): 1543 – 1549.)
- [22] MUSAB H M, IMTIAZ S, KHAN F, et al. Early detection and estimation of kick in managed pressure drilling. *SPE Drilling & Completion*, 2021, 36(2): 245 – 262.
- [23] MUSAB H M, IMTIAZ S, KHAN F, et al. Prediction of reservoir-kick effect and its management in the managed-pressure-drilling operation. *SPE Drilling & Completion*, 2021, 36(3): 575 – 602.
- [24] STAMNES O N, AAMO O M, KAASA G O. Adaptive redesign of nonlinear observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(5): 1152 – 1157.
- [25] KUDVA P, VISWANADHAM N, RAMAKRISHNA A. Observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(1): 113 – 115.
- [26] POURGHOLI M, MAJD V J. A new non-fragile H_∞ proportional-integral filtered-error adaptive observer for a class of non-linear systems and its application to synchronous generators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2011, 225(1): 99 – 112.
- [27] TYUKIN I Y, STEUR E, NIJMEIJER H, et al. Adaptive observers and parameter estimation for a class of systems nonlinear in the parameters. *Automatica*, 2013, 49(8): 2409 – 2423.
- [28] ZHU J, KHAYATI K. Adaptive observer for a class of second order nonlinear systems. *2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications*. Hammamet: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [29] PERTEWA A M, MARQUEZ H J, ZHAO Q. H_∞ observer design for Lipschitz nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(7): 1211 – 1216.
- [30] RAOUFI R, MARQUEZ H, ZINOBER A. H_∞ sliding mode observers for uncertain nonlinear Lipschitz systems with fault estimation synthesis. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(16): 1785 – 1801.
- [31] CHO Y M, RAJAMANI R. A systematic approach to adaptive observer synthesis for nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(4): 534 – 537.
- [32] OUCIEF N, TADJINE M, LBAIOD S. A new methodology for an adaptive state observer design for a class of nonlinear systems with unknown parameters in unmeasured state dynamics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, 40(4): 1297 – 1308.
- [33] WANG Yan, WANG Xin, WANG Zhenlei. Multiple models second level adaptive control of multivariable periodic systems. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(3): 391 – 397.
(王岩, 王昕, 王振雷. 多变量周期系统的多模型二阶段自适应控制. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 391 – 397.)
- [34] ZHANG Z. *The Schur Complement and Its Applications*. New York: Springer, 2005.
- [35] CPRLESS M, TU J. State and input estimation for a class of uncertain systems. *Automatica*, 1998, 34(6): 757 – 764.

作者简介:

徐宝昌 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为复杂系统建模与先进控制、多传感器信息融合与软测量技术、钻井工程自动化, E-mail: xbcyl@163.com;

吴楠 硕士研究生, 目前研究方向为钻井工程自动化, E-mail: 13121171017@163.com;

孟卓然 博士研究生, 目前研究方向为系统优化与智能控制, E-mail: meng_zrcup8@163.com.