

控制与决策

Control and Decision

深水钻井隔水管反冲系统的含记忆模糊滑模控制方法

鄢守祥, 张宝琳, 赵艳东

引用本文:

鄢守祥, 张宝琳, 赵艳东. 深水钻井隔水管反冲系统的含记忆模糊滑模控制方法[J]. *控制与决策*, 2026, 41(1): 81-92.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0412>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449-1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制](#)

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 3007-3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

[基于反馈无源化的切换非线性系统 \$H_\infty\$ 跟踪控制](#)

Passification-based H_∞ tracking control for a class of switched nonlinear systems
控制与决策. 2021, 36(11): 2729-2734 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0798>

[基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制](#)

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm
控制与决策. 2021, 36(1): 173-179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

[基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制](#)

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization
控制与决策. 2021, 36(1): 97-104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

深水钻井隔水管反冲系统的含记忆模糊滑模控制方法

鄢守祥, 张宝琳[†], 赵艳东

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 深水钻井隔水管是深海油气开采的重要装备, 其紧急解脱后的反冲运动对于钻井平台以及海底井口具有潜在的碰撞风险. 鉴于此, 研究隔水管-张紧器耦合非线性系统的 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊建模及其含记忆模糊滑模反冲控制问题. 首先, 采用 T-S 模糊建模方法给出隔水管-张紧器非线性反冲系统的模糊模型; 然后, 提出含记忆的模糊滑模反冲控制器设计方法, 得到含记忆模糊滑模反冲控制器的存在条件和求解方法; 最后, 通过仿真结果表明, 所提出含记忆的模糊滑模反冲控制器能够有效抑制隔水管反冲响应幅值, 改善钻井隔水管实施紧急解脱的安全性和可靠性.

关键词: 隔水管; 时滞反馈; 模糊控制; 滑模控制; 反冲抑制; 非线性系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0412

引用格式: 鄢守祥, 张宝琳, 赵艳东. 深水钻井隔水管反冲系统的含记忆模糊滑模控制方法 [J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 81-92.

Fuzzy sliding mode control method with memory for deepwater drilling riser recoil systems

YAN Shou-xiang, ZHANG Bao-lin[†], ZHAO Yan-dong

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The deepwater drilling riser is important equipment for deep-sea oil and gas production. The recoil movement of the riser after emergency disconnection has potential collision risk to drilling platform and subsea wellhead. In this paper, takagi-sugenod (T-S) fuzzy modeling and fuzzy sliding mode recoil control for riser-tensioner coupled nonlinear systems are studied. First, the fuzzy model of riser-tensioner nonlinear recoil system is presented using the T-S fuzzy modeling method. Second, the design method of fuzzy sliding mode recoil controller with memory is given, and the existence condition and solving method of the fuzzy sliding mode recoil controller with memory are obtained. The simulation results show that the fuzzy sliding mode recoil controller with memory proposed can effectively suppress the recoil response amplitude of the riser and improve the safety and reliability of emergency disconnection of the drilling riser.

Keywords: riser; delayed feedback; fuzzy control; sliding mode control; recoil suppression; nonlinear system

0 引言

深海钻井隔水管系统连接着浮式海上平台与水下井口, 起着隔离管外海水和循环管内钻井泥浆的重要作用. 在正常钻井作业中, 隔水管顶部的张紧器始终保持拉紧状态, 以防止涡激振动和过度侧向变形风险发生. 然而, 当遭遇极端天气或动力定位失效时, 需要断开隔水管底部总成与防喷器的连接, 进行装备紧急回收操作. 此时, 管内储存的巨大势能会瞬间释放, 导致隔水管在轴向张紧力的作用下急剧反

冲^[1-3]. 剧烈的反冲运动可能会导致钻井平台偏移, 隔水管与平台以及井口的碰撞, 甚至会造成钻井船灾难事故. 因此, 抑制隔水管紧急解脱后的反冲响应是深水作业面临的重要挑战之一^[4-5]. 分析影响反冲响应的因素, 并采用安全可靠的反冲抑制方法, 对于提高深水作业的安全性具有重要意义.

隔水管的反冲运动涉及多个复杂过程, 包括管柱内钻井液下泄、平台升沉运动、张紧器以及隔水管等多个关键因素. 钻井平台受海浪环境载荷影响而

收稿日期: 2025-04-18; 录用日期: 2025-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62473221); 山东省自然科学基金项目 (ZR2024MF006); 青岛市自然科学基金项目 (24-4-4-zrjj-165-jch).

责任编辑: 牛玉刚.

[†]通信作者. E-mail: zhangbl2006@163.com.

产生的上下升沉运动通过张紧器传递至隔水管顶部,进而加剧其反冲响应.文献[6]采用了单一谐波函数仿真平台的规则升沉运动;考虑到升沉运动通常具有不确定性和随机性,文献[7]采用谐波函数叠加的形式模拟并分析了平台的随机升沉响应.隔水管紧急断开的瞬间,管内泥浆会沿管道释放至海水中,与管壁间产生的摩擦阻力对于反冲响应的影响也不容忽视^[8].目前,关于钻井液黏滞阻力的计算,学者们相继提出了若干计算模型,如Young's段塞模型^[9]、全液柱模型^[10-11]以及流体动力学计算模型^[12]等.不难发现,这类计算模型能够不同程度地近似摩擦阻力,但是计算量较大.文献[13]和文献[14]分别采用了正弦或指数函数曲线拟合的方法来描述摩擦阻力特性.进一步地,建立了其线性外系统辨识模型.为分析隔水管-张紧器耦合系统的反冲响应特性,通常基于集中质量法等将其简化为弹簧-质量-阻尼模型^[15-16].注意到,上述模型中忽略了张紧器顶张力的非线性特性,文献[17]给出了考虑张紧器顶张力非线性特性的隔水管反冲系统非线性模型,进而研究了系统的模糊反冲控制方法.

近年来,为有效抑制隔水管的反冲响应,学者们将主动结构振动控制思想引入隔水管反冲系统^[17-18].文献[19]设计了线性二次型最优反冲控制器用于抑制隔水管系统的轴向反冲位移,结果表明,最优反冲控制方法能够显著抑制反冲运动幅值;文献[20]和文献[21]分别研究了隔水管反冲抑制的前馈-反馈最优反冲控制方法和自适应反冲控制方法.注意到,时滞广泛存在于实际控制系统^[22-24].特别地,对于具有振荡特性的系统,引入适当大小的时滞往往能够在一定程度上改善系统的性能^[25-27].不难发现,针对隔水管反冲控制问题的研究,反冲控制方法设计绝大多数基于线性化模型^[19-21,25-26],而少数文献考虑了系统的非线性特性^[17].为此,建立更一般化的深水隔水管反冲控制系统模型并寻求有效的非线性反冲控制方法对于解决隔水管反冲控制问题,提高隔水管系统的安全性具有重要意义.

本文尝试建立能够准确反映隔水管紧急解脱后反冲响应特性的更一般化非线性反冲控制模型,并融合时滞反馈控制方法^[25-27]和滑模控制方法^[28-30],研究深水隔水管含记忆的模糊滑模反冲控制方法.与现有研究成果相比,本文的主要内容如下:

1) 综合考虑隔水管非线性顶张力、控制输入扰动、平台升沉、钻井下泄液黏滞阻力以及未建模扰动等因素,建立隔水管更一般的受扰非线性反冲控制模型,进而建立隔水管-张紧器耦合非线性反冲控制

系统的Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型;

2) 通过在控制通道人为引入时滞,给出钻井隔水管反冲控制系统的含记忆模糊滑模反冲控制器设计方法、存在条件及其控制器增益求解方法.

1 模糊隔水管-张紧器非线性反冲模型

1.1 隔水管-张紧器非线性反冲模型

隔水管-张紧器耦合系统的弹簧-质量-阻尼简化模型^[15]如图1所示.其中: m_1 、 m_2 和 m_3 为隔水管的3个等效质量块, k_i 和 c_i ($i = 1, 2, 3$)分别为等效轴向刚度和阻尼系数, $h(t)$ 为作用于每个质量块的钻井下泄液黏滞阻力, $w(t)$ 为平台升沉运动.为建立隔水管-张紧器系统反冲动力学方程,给出下述假设^[19]:

假设1 在初始解脱时刻,等效质量块分别处于各自独立的坐标系中.规定隔水管反冲位移和所需控制力的向上方向为正,反之为负.

假设2 忽略浮力块对于隔水管刚度的影响,仅考虑轴向浮力对于隔水管反冲的作用.

假设3 钻井管柱内泥浆下泄和海水填充过程中产生的黏滞摩擦阻力在隔水管的轴向方向上是均匀分布的.

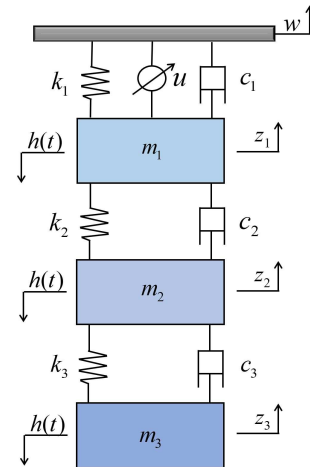


图1 隔水管-张紧器系统模型^[15]

基于上述假设并结合牛顿第二定律,隔水管-张紧器耦合系统的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = F_t - c_1 \dot{z}_1 - k_2(z_1 - z_2) + \varpi_1(t) - \\ \quad c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - h(t) - r(t), \\ m_2 \ddot{z}_2 = k_2(z_1 - z_2) + c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \\ \quad k_3(z_2 - z_3 - z_{20}) - c_3(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + \\ \quad \varpi_2(t) - h(t), \\ m_3 \ddot{z}_3 = k_3(z_2 - z_3 - z_{20}) + c_3(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + \\ \quad \varpi_3(t) - h(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: z_i 为质量块的轴向位移; $\varpi_i(t) = -m_i g + f_{bi}$ ($i = 1, 2, 3$), g 为重力加速度, f_{bi} 为3个质量块受到

的浮力; z_{20} 为质量块 m_2 在紧急断开时的初始位移; $r(t)$ 为系统未建模扰动; $m_1 = m_r/3 + m_s$, $m_2 = m_r/3$, $m_3 = m_r/3 + m_l$, m_r 、 m_s 和 m_l 分别为隔水管、伸缩节和隔水管底部总成的质量; F_t 为张紧器的顶张力^[17], 如下所示:

$$F_t = F_0 - k_1 z_p(t) - u(t) + n(t). \quad (2)$$

这里: $z_p(t) = z_1 - w(t)$; $F_0 = \hat{p}_0 a_r - \check{p}_0 a_p$, \hat{p}_0 和 \check{p}_0 分别为初始时刻高压空气容器和低压氮气容器的压力, a_r 和 a_p 分别为活塞有杆侧和无杆侧面积; k_1 为张紧器刚度系数; $n(t) = \sum_{i=2}^m k_{1i} z_p^i(t)$, $k_{1i} = \prod_{m=0}^{i-1} (\kappa + m) \Delta_i / i!$, 其中

$$\Delta_i = (-1)^i \hat{p}_0 a_r^{i+1} / \hat{v}_0^i - \check{p}_0 a_p^{i+1} / \check{v}_0^i. \quad (3)$$

这里: \hat{v}_0 和 \check{v}_0 分别为初始时刻高压空气瓶和低压氮气的体积, κ 为气体常数且 $\kappa \in [1.0, 1.4]$.

式(2)中, 控制力 $u(t)$ 可表示为

$$u(t) = -\frac{\varepsilon \rho_0 \dot{z}_p^3 a_r^3}{2|\dot{z}_p| \lambda^2(t) a_\lambda}. \quad (4)$$

其中: ρ_0 为液压油的密度, ε 、 $\lambda(t)$ 和 a_λ 分别为液压油流动摩擦系数、防反冲控制阀实时开度和全开面积。

系统的平衡态记为

$$z_e = [z_{e1} \quad \dot{z}_{e1} \quad z_{e2} \quad \dot{z}_{e2} \quad z_{e3} \quad \dot{z}_{e3}]^T,$$

其中 z_{e1} 、 z_{e2} 和 z_{e3} 满足

$$\begin{cases} F_0 - k_1 z_{e1}(t) - u(t) + n(z_{e1}) + \varpi_1(t) + \varpi_2(t) + \varpi_3(t) = 0, \\ k_2(z_{e1} - z_{e2}) - k_3(z_{e2} - z_{e3} - z_{20}) + \varpi_2(t) + \varpi_3(t) = 0, \\ k_3(z_{e2} - z_{e3} - z_{20}) + \varpi_3(t) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

令 $\tilde{z}(t) = z(t) - z_e$, 易计算得到, 反冲发生时,

3 个质量块的初始位移 \tilde{z}_{10} 、 \tilde{z}_{20} 和 \tilde{z}_{30} 满足

$$\begin{aligned} \tilde{z}_{10} &= 0, \quad \tilde{z}_{20} = -(F_0 + \varpi_1(t)) / k_2, \\ \tilde{z}_{30} &= -(F_0 + \varpi_1(t) + \varpi_2(t)) / k_3. \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到控制输入摄动, 令

$$\tilde{u}(t) = u(t) + \nu(t), \quad (7)$$

其中 $\nu(t)$ 为有界时变输入摄动. 于是, 由式(1)~(7), 并用 $\tilde{u}(t)$ 替换 $u(t)$, 可得到

$$\begin{cases} m_1 \dot{\tilde{z}}_1 = -k_1 \tilde{z}_1 + k_1 w(t) - \tilde{u}(t) - c_1 \dot{\tilde{z}}_1 - k_2(\tilde{z}_1 - \tilde{z}_2) + n(\tilde{z}_1 + z_{e1} - w(t)) - n(z_{e1}) - c_2(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_2) - h(t) - r(t), \\ m_2 \dot{\tilde{z}}_2 = k_2(\tilde{z}_1 - \tilde{z}_2) + c_2(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_2) - h(t) - c_3(\dot{\tilde{z}}_2 - \dot{\tilde{z}}_3) - k_3(\tilde{z}_2 - \tilde{z}_3), \\ m_3 \dot{\tilde{z}}_3 = k_3(\tilde{z}_2 - \tilde{z}_3) + c_3(\dot{\tilde{z}}_2 - \dot{\tilde{z}}_3) - h(t). \end{cases} \quad (8)$$

令 $x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T$. 其中: $x_1 = \tilde{z}_1$, $x_2 = \dot{\tilde{z}}_1$, $x_3 = \tilde{z}_2$, $x_4 = \dot{\tilde{z}}_2$, $x_5 = \tilde{z}_3$, $x_6 = \dot{\tilde{z}}_3$. 令 $a_{21} = -(k_1 + k_2)/m_1$, $a_{22} = -(c_1 + c_2)/m_1$, $a_{23} = k_2/m_1$, $a_{24} = c_2/m_1$, $a_{41} = k_2/m_2$, $a_{42} = c_2/m_2$, $a_{43} = -(k_2 + k_3)/m_2$, $a_{44} = -(c_2 + c_3)/m_2$, $a_{45} = k_3/m_2$, $a_{46} = c_3/m_2$, $a_{63} = k_3/m_3$, $a_{64} = c_3/m_3$, $a_{65} = -k_3/m_3$, $a_{66} = -c_3/m_3$. 于是, 可得到隔水管-张紧器耦合反冲控制系统的状态空间模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B(\tilde{u}(t) + r(t)) + D_h h(t) + D_w w(t) + D_n n(x(t), w(t)), \\ x(0) &= x_0. \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$x_0 = [\tilde{z}_1(0) \quad 0 \quad \tilde{z}_2(0) \quad 0 \quad \tilde{z}_3(0) \quad 0]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix},$$

$$B = -D_n = [0 \quad -1/m_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$D_h = -[0 \quad 1/m_1 \quad 0 \quad 1/m_2 \quad 0 \quad 1/m_3]^T,$$

$$D_w = [0 \quad k_1/m_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

1.2 隔水管系统的 T-S 模糊模型

注意到, 张紧器提供的非线性顶张力 $n(x(t), w(t))$ ^[17] 可表示为

$$n(x(t), w(t)) = n_1(x(t), w(t)) + n_2(x(t), w(t)). \quad (10)$$

其中: $n_1 = \sum_{i=2}^6 k_{1i} z_p^i(t)$, $n_2 = \sum_{i=7}^{\infty} k_{1i} z_p^i(t)$.

由文献 [17] 可知, $n_1(x(t), w(t))$ 可进一步表示为

$$n_1(x(t), w(t)) = k_x(t)x_1(t) + k_w(t)w(t). \quad (11)$$

其中: $k_x(t) = \sum_{i=2}^6 k_{1i} x_{1i}(t)$, $k_w(t) = \sum_{i=2}^6 k_{1i} w_{1i}(t)$, $x_{1i}(t)$ 和 $w_{1i}(t)$ 的具体表达式可参见文献 [17], 不再赘述。

记平台升沉运动 $w(t) = w_m(t) + w_n(t)$, 其中 $w_m(t)$ 和 $w_n(t)$ 分别为平台升沉运动的可辨识部分和未建模的有界部分. 通常, 可辨识分量 $w_m(t)$ ^[18,31] 表示为

$$w_m(t) = \sum_{j=1}^s \tilde{a}_j \sin(\omega_j t + \theta_j). \quad (12)$$

其中: \tilde{a}_j 、 ω_j 和 θ_j 分别为第 j 个谐波函数的幅值、频率和相位角, $j = 1, 2, \dots, s$. 令

$$\varphi(t) = [v(t) \quad \dot{v}(t)]^T, \quad (13)$$

这里 $v(t) = [\sin(\omega_1 t + \theta_1), \dots, \sin(\omega_s t + \theta_s)]$. 记

$$\mathcal{W}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathcal{N}_1 & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathcal{W}_2 = [\mathcal{N}_2 \quad \mathbf{0}].$$

其中: \mathbf{I} 和 $\mathbf{0}$ 分别为适当维数的单位矩阵和零矩阵,

$$\mathcal{N}_1 = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\omega_s^2 \end{bmatrix}, \mathcal{N}_2^T = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \vdots \\ \tilde{a}_s \end{bmatrix}.$$

于是, $w_m(t)$ 可描述为如下外系统的输出:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) &= \mathcal{W}_1 \varphi(t), w_m(t) = \mathcal{W}_2 \varphi(t), \\ \varphi(0) &= \varphi_0, \end{aligned} \quad (14)$$

这里 φ_0 为初始状态. 事实上, $w_m(t)$ 的计算可进一步通过设计如下平台升沉扰动观测器进行求解:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\varphi}}(t) = (\mathcal{W}_1 + L_w \mathcal{W}_2) \hat{\varphi}(t) - L_w w_m(t), \\ \hat{w}_m(t) = \mathcal{W}_2 \hat{\varphi}(t), \hat{\varphi}(0) = \hat{\varphi}_0. \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\hat{\varphi}_0$ 为给定的初始条件, L_w 为适当维数的增益矩阵, $\hat{w}_m(t)$ 为 $w_m(t)$ 的观测值. 记观测误差为 $\tilde{w}_m(t) = w_m(t) - \hat{w}_m(t)$, 满足 $\|\tilde{w}(t)\| \leq \varpi (\varpi > 0)$.

注1 由观测器设计理论可知, 若 $(\mathcal{W}_1, \mathcal{W}_2)$ 完全可观测, 则存在增益矩阵 L_w , 使得当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{w}_m(t) \rightarrow w_m(t)$ 成立. 事实上, 令 $v_e(t) = \hat{v}(t) - v(t)$, 由式 (14) 和 (15) 可得到观测误差 $v_e(t)$ 满足 $\dot{v}_e(t) = (\mathcal{W}_1 + L_w \mathcal{W}_2)v_e(t)$. 显然, 采用极点配置方法可设计增益矩阵 L_w 以保证误差系统的渐近稳定性. 基于平台升沉运动的可辨识和未建模部分的分解, 由式 (9), 可进一步得到

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(u(t) - f(t)) + \\ &D_h h(t) + D_w(t)w_m(t). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} D_w(t) &= [0 \quad (k_1 + k_w(t))/m_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \\ f(t) &= \\ n_2(x(t), w(t)) - r(t) - \nu(t) + (k_1 + k_w(t))w_n(t), \\ A(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21}^*(t) & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

这里 $a_{21}^*(t) = -(k_1 + k_2 - k_x(t))/m_1$. 下面讨论中, 设 $f(t)$ 有界, 即存在常数 $\hat{f} > 0$, 使得 $f(t)$ 满足 $|f(t)| \leq \hat{f}$.

为计算钻井下泄液黏滞阻力, 采用全液柱模型^[19]及其指数-多项式型辨识模型^[14], 有

$$h(t) = \exp(\lambda_0 t) \sum_{i=1}^q \lambda_i t^{i-1}. \quad (17)$$

其中: $\exp(\cdot)$ 为指数函数, λ_i 为辨识系数. 令

$$\vartheta(t) = [\vartheta_1(t) \quad \vartheta_2(t) \quad \dots \quad \vartheta_q(t)]^T, \quad (18)$$

这里

$$\vartheta_j(t) = t^{j-1} \exp(\lambda_0 t), j = 1, 2, \dots, q. \quad (19)$$

于是, 下泄液黏滞阻力 $h(t)$ 可表示为下述外系统的输出:

$$\dot{\vartheta}(t) = \mathcal{S}_1 \vartheta(t), h(t) = \mathcal{S}_2 \vartheta(t), \vartheta(0) = \vartheta_0. \quad (20)$$

其中: ϑ_0 为外系统的初始状态,

$$\mathcal{S}_1 = \begin{bmatrix} \lambda_0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \lambda_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_0 \end{bmatrix}, \mathcal{S}_2^T = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_s \end{bmatrix}.$$

注2 式 (16) 给出了隔水管反冲控制系统的更一般化受扰非线性时变反冲模型. 若令 $n_2(x(t), w(t)) = r(t) = \nu(t) = w_n(t) = 0$, 即不考虑高阶非线性顶张力、系统未建模动态、控制输入摄动和升沉运动未辨识分量, 则模型 (16) 退化为文献 [17] 给出的非线性反冲模型; 进一步地, 令 $n_1(x, w) = 0$, 则模型 (16) 退化为线性化模型^[19-21, 25-26].

下面给出隔水管反冲时变非线性系统 (16) 的 T-S 模糊近似. 为此, 选择 $k_x(t)$ 和 $k_w(t)$ 为模糊前件变量, 并假设

$$k_x^m \leq k_x(t) \leq k_x^M, k_w^m \leq k_w(t) \leq k_w^M. \quad (21)$$

其中: k_x^m 和 k_x^M 分别为 $k_x(t)$ 的下界和上界, k_w^m 和 k_w^M 分别为 $k_w(t)$ 的下界和上界.

定义如下隶属度函数:

$$\begin{cases} \mathfrak{S}_1(k_x(t)) = (k_x(t) - k_x^m)/(k_x^M - k_x^m), \\ \mathfrak{S}_2(k_x(t)) = (k_x^M - k_x(t))/(k_x^M - k_x^m); \\ \mathfrak{N}_1(k_w(t)) = (k_w(t) - k_w^m)/(k_w^M - k_w^m), \\ \mathfrak{N}_2(k_w(t)) = (k_w^M - k_w(t))/(k_w^M - k_w^m). \end{cases} \quad (22)$$

易验证得到

$$\begin{cases} \mathfrak{S}_1(k_x(t)) + \mathfrak{S}_2(k_x(t)) = 1, \\ \mathfrak{N}_1(k_w(t)) + \mathfrak{N}_2(k_w(t)) = 1. \end{cases} \quad (23)$$

于是, 非线性项 $k_x(t)$ 和 $k_w(t)$ 可分别表示为

$$k_x(t) = \mathfrak{S}_1(k_x(t))k_x^M + \mathfrak{S}_2(k_x(t))k_x^m, \quad (24)$$

$$k_w(t) = \mathfrak{N}_1(k_w(t))k_w^M + \mathfrak{N}_2(k_w(t))k_w^m. \quad (25)$$

定义 IF-THEN 模糊规则为

Fuzzy Rule $i(i = 1, 2, 3, 4)$:

IF $k_x(t)$ is $\mathfrak{S}_s(k_x(t))$ and $k_w(t)$ is $\mathfrak{N}_j(k_w(t))$,

Then $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B(u(t) - f(t)) + D_h h(t) + D_{wi} w_m(t)$. (26)

其中: $s = 1, 2; j = 1, 2$. 于是, 隔水管反冲非线性系统可近似表示为如下 T-S 模糊模型:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \phi_k(t) [A_i x(t) + B(u(t) - f(t)) + D_h h(t) + D_{wi} w_m(t)]. \quad (27)$$

这里

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &= \mathfrak{S}_1(k_x(t)) \times \mathfrak{N}_1(k_w(t)), \\ \phi_2(t) &= \mathfrak{S}_1(k_x(t)) \times \mathfrak{N}_2(k_w(t)), \\ \phi_3(t) &= \mathfrak{S}_2(k_x(t)) \times \mathfrak{N}_1(k_w(t)), \\ \phi_4(t) &= \mathfrak{S}_2(k_x(t)) \times \mathfrak{N}_2(k_w(t)), \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $0 \leq \phi_i(t) \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^4 \phi_i(t) = 1$.

令 $\tilde{x}(t) = [x^T(t) \quad \vartheta^T(t)]^T$, 则由式 (20) 和 (27), 可得到隔水管增广模糊反冲系统为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^4 \phi_i(t) [\tilde{A}_i \tilde{x}(t) + \tilde{D}_{wi} w_m(t) + \tilde{B}(u(t) - f(t))]. \quad (29)$$

其中

$$\tilde{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & D_h S_2 \\ \mathbf{0} & S_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \tilde{D}_{wi} = \begin{bmatrix} D_{wi} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

这里矩阵 (A_i, D_{wi}) 中的 $k_x(t)$ 和 $k_w(t)$ 分别用 (k_x^m, k_w^m) 、 (k_x^m, k_w^M) 、 (k_x^M, k_w^m) 和 (k_x^M, k_w^M) 替换得到.

设隔水管反冲系统的控制输出方程为

$$\eta(t) = C_\eta \tilde{x}(t) + E_\eta w_m(t), \quad (30)$$

其中 C_η 和 E_η 为已知的适维数矩阵.

本文的目的在于设计隔水管含有记忆的模糊滑模反冲控制器, 使得隔水管反冲控制系统 (29) 在所设计模糊滑模反冲控制器作用下:

1) 系统的滑模运动当 $w_m(t) \equiv 0$ 时渐近稳定, 且滑模运动满足如下 H_∞ 性能指标^[32]:

$$\|\eta(t)\| \leq \gamma^2 \|w_m(t)\|, \quad (31)$$

其中 $\gamma > 0$.

2) 系统的状态轨迹能够在有限时间到达滑模面.

为得到本文的主要结果, 给出以下引理.

引理 1^[33] 对于一个正定的 Lyapunov 函数 $V(z)$, 存在常数 $\kappa_1 > 0$ 和 $0 < \kappa_2 < 1$, 使得下述一阶微分不等式成立:

$$\dot{V}(z) + \kappa_1 V^{\kappa_2}(z) \leq 0, \quad (32)$$

则对于任意初始条件 $V(z(0)) = V(0)$, $V(z)$ 从初始值 $V(0)$ 到 0 的有限时间 t_f 可计算为

$$t_f \leq V^{1-\kappa_2}(0) / [\kappa_1(1-\kappa_2)]. \quad (33)$$

引理 2^[34] 对于任意对称实矩阵 $R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, 矩阵 $\mathcal{X} = [\mathcal{X}_1 \quad \mathcal{X}_2 \quad \mathcal{X}_3]^T$ 和 $\mathcal{Y} = [\mathcal{Y}_1 \quad \mathcal{Y}_2 \quad \mathcal{Y}_3]^T$, $\mathcal{X}_i, \mathcal{Y}_i \in \mathbb{R}^{n \times n} (i = 1, 2, 3)$, 向量函数 $\dot{x} : [\kappa_1, \kappa_2] \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, 则下列不等式成立:

$$-\int_{\kappa_1}^{\kappa_2} \dot{x}^T(s) \tilde{R} \dot{x}(s) ds \leq \varsigma^T (\Delta + \nabla) \varsigma. \quad (34)$$

其中

$$\varsigma = \left[x^T(\kappa_2) \quad x^T(\kappa_1) \quad \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} x^T(s) ds / (\kappa_2 - \kappa_1) \right]^T,$$

$$\Delta = (\kappa_2 - \kappa_1) [\mathcal{X} R^{-1} \mathcal{X}^T + \mathcal{Y} (3R)^{-1} \mathcal{Y}^T],$$

$$\nabla = \begin{bmatrix} \nabla_{11} & \nabla_{12} & \nabla_{13} \\ * & \nabla_{22} & \nabla_{23} \\ * & * & \nabla_{33} \end{bmatrix},$$

$$\nabla_{11} = \mathcal{X}_1 + \mathcal{X}_1^T + \mathcal{Y}_1 + \mathcal{Y}_1^T,$$

$$\nabla_{12} = -\mathcal{X}_1^T + \mathcal{X}_2 + \mathcal{Y}_1^T + \mathcal{Y}_2,$$

$$\nabla_{13} = \mathcal{X}_3 + \mathcal{Y}_3 - 2\mathcal{Y}_1^T,$$

$$\nabla_{22} = -\mathcal{X}_2 - \mathcal{X}_2^T + \mathcal{Y}_2 + \mathcal{Y}_2^T,$$

$$\nabla_{23} = -\mathcal{X}_3 - 2\mathcal{Y}_2^T + \mathcal{Y}_3,$$

$$\nabla_{33} = -2\mathcal{Y}_3 - 2\mathcal{Y}_3^T.$$

2 含记忆模糊滑模反冲控制器设计

令 $u_{1j}^*(t) = -K_{1j} \tilde{x}(t) - K_{2j} \tilde{x}(t - \tau) - K_{wj} \hat{w}_m(t)$.

其中: $j = 1, 2, 3, 4$; K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{wj} 为待求解的控制增益矩阵; $\tau > 0$ 为人为引入的常数时滞.

设计如下含记忆的时滞积分滑模面函数:

$$s(t) = \tilde{B}^\dagger \left(\tilde{x}(t) - \tilde{x}_0 - \int_0^t \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(s) (\tilde{A}_i \tilde{x}(s) + \tilde{B} u_{1j}^*(s) + \tilde{D}_{wi} \hat{w}_m(s)) ds \right), \quad (35)$$

其中 $\tilde{B}^\dagger = (\tilde{B}^T \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T$. 进而, 隔水管反冲系统的含记忆模糊滑模反冲控制器可设计为

$$u(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t) (u_{1j}^*(t) + u_N(t)), \quad (36)$$

这里

$$u_N(t) = -(\rho + \hat{f} + \varpi \|\tilde{B}^\dagger \tilde{D}_{wi}\|) \text{sgn}(s(t)), \quad (37)$$

其中 $\rho > 0$.

定理 1 对于隔水管模糊反冲控制系统 (29), 若滑模面由式 (35) 给出, 则在含记忆模糊滑模反冲控制律 (36) 作用下, 闭环系统的状态轨迹能够在有限时间内到达且保持在滑模面 $s(t) = 0$.

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V(t) = s^T(t) s(t) / 2. \quad (38)$$

由式 (29)、(35) 和 (38), 易得到

$$\dot{s}(t) = \sum_{i=1}^4 \phi_i(t)[u_N(t) - f(t) + \tilde{B}^\dagger \tilde{D}_{wi} \tilde{w}_m(t)]. \quad (39)$$

进而, 可得到

$$\dot{V}(t) = s^\top(t)\dot{s}(t) \leq -\rho|s(t)|, \quad \forall s(t) \neq 0. \quad (40)$$

由式 (40), 可得到 $\dot{V}(s(t)) + \sqrt{2}\rho V^{1/2}(s(t)) \leq 0$. 然后, 由引理 1 可得到, 在含记忆模糊滑模反冲控制器 (36) 作用下, 系统状态轨迹能够在有限时间 t_f 到达并保持于滑模面 $s(t) = 0$, 其中 $t_f \leq \sqrt{2}V^{1/2}(0)/\rho$. \square

下面讨论滑模运动的渐近稳定且满足 H_∞ 指标. 为此, 令 $\dot{s}(t) = 0$, 则等效控制律可表示为

$$u^{eq}(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t)(u_{1j}(t) + u_N^{eq}(t)), \quad (41)$$

其中

$$u_N^{eq}(t) = f(t) - \tilde{B}^\dagger \tilde{D}_{wi} \tilde{w}_m(t). \quad (42)$$

令

$$K_{wj} = \sum_{k=1}^4 \phi_k(t)(\tilde{B}^\dagger \tilde{D}_k),$$

$$\hat{D}_i = \sum_{i=1}^4 \phi_i(t)(\tilde{B}^\dagger \tilde{B}^{\perp\dagger} \tilde{D}_{wi}).$$

其中: \tilde{B}^\perp 满足 $\tilde{B}\tilde{B}^\perp = I_n - \tilde{B}^\dagger \tilde{B}^{\perp\dagger}$, $\tilde{B}^\top \tilde{B}^\perp = 0$. 于是, 系统的滑模运动可表示为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t)[(\tilde{A}_i - \tilde{B}K_{1j})\tilde{x}(t) - \tilde{B}K_{2j}\tilde{x}(t-\tau) + \hat{D}_i w_m(t)]. \quad (43)$$

令

$$E_1 = [I \quad 0 \quad 0], \quad E_2 = [0 \quad I \quad 0],$$

$$E_3 = [0 \quad 0 \quad I],$$

$$\alpha(t) = [\tilde{x}^\top(t) \quad \tilde{x}^\top(t-\tau) \quad \int_{t-\tau}^t \tilde{x}^\top(s)ds]^\top,$$

则

$$[\dot{\tilde{x}}(t) \quad \tilde{x}(t-\tau) \quad \int_{t-\tau}^t \tilde{x}(s)ds] = [E_1 \quad E_2 \quad E_3]\alpha(t).$$

于是, 滑模运动 (43) 可进一步表示为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t)((\tilde{A}_i - \tilde{B}K_{1j})E_1 - \tilde{B}K_{2j}E_2 + \hat{D}_i w_m(t)). \quad (44)$$

定理 2 给定 $\tau > 0$ 和 $\gamma > 0$, 若存在 12×12 实矩阵 $\bar{P} > 0$, $\bar{Q} > 0$, $\bar{R} > 0$, $\bar{\mathcal{X}}_1, \bar{\mathcal{X}}_2, \bar{\mathcal{X}}_3, \bar{\mathcal{Y}}_1, \bar{\mathcal{Y}}_2, \bar{\mathcal{Y}}_3$ 以及 1×12 矩阵 \bar{K}_{1j} 和 \bar{K}_{2j} , 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_{ij}^{11} & E_1^\top \hat{D}_i & \bar{\Psi}_{ij}^{13} & E_1^\top C_\eta^\top & \bar{\Psi}^{15} & \bar{\Psi}^{16} \\ * & -\gamma^2 I & \tau \hat{D}_i^\top & E_\eta^\top & 0 & 0 \\ * & * & -\bar{P}\bar{R}^{-1}\bar{P} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & * & -3\bar{R} \end{bmatrix} < 0. \quad (45)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{ij}^{11} &= E_1^\top (\tilde{A}_i \bar{P} + \bar{P} \tilde{A}_i^\top - \tilde{B} \bar{K}_{1j} - \bar{K}_{1j}^\top \tilde{B}^\top + \bar{Q}) E_1 - E_1^\top (\tilde{B} \bar{K}_{2j} + \bar{K}_{2j}^\top \tilde{B}^\top) E_2 - E_2^\top \bar{Q} E_2 + \tau E_1^\top (\bar{\mathcal{E}}_{12} + \bar{\mathcal{E}}_{12}^\top) E_2 + \tau E_1^\top (\bar{\mathcal{E}}_{13} + \bar{\mathcal{E}}_{13}^\top) E_3 + \tau E_2^\top (\bar{\mathcal{E}}_{23} + \bar{\mathcal{E}}_{23}^\top) E_3 + \tau E_1^\top \bar{\mathcal{E}}_{11} E_1 + \tau E_2^\top \bar{\mathcal{E}}_{22} E_2 + \tau E_3^\top \bar{\mathcal{E}}_{33} E_3, \\ \bar{\Psi}_{ij}^{13} &= \tau (E_1^\top \bar{P} \tilde{A}_i^\top - E_1^\top \bar{K}_{1j}^\top \tilde{B}^\top - E_2^\top \bar{K}_{2j}^\top \tilde{B}^\top), \\ \bar{\Psi}^{15} &= \tau (E_1^\top \bar{\mathcal{X}}_1^\top + E_2^\top \bar{\mathcal{X}}_2^\top + E_3^\top \bar{\mathcal{X}}_3^\top), \\ \bar{\Psi}^{16} &= \tau (E_1^\top \bar{\mathcal{Y}}_1^\top + E_2^\top \bar{\mathcal{Y}}_2^\top + E_3^\top \bar{\mathcal{Y}}_3^\top), \\ \bar{\mathcal{E}}_{11} &= \bar{\mathcal{X}}_1 + \bar{\mathcal{X}}_1^\top + \bar{\mathcal{Y}}_1 + \bar{\mathcal{Y}}_1^\top, \\ \bar{\mathcal{E}}_{12} &= -\bar{\mathcal{X}}_1^\top + \bar{\mathcal{X}}_2^\top + \bar{\mathcal{Y}}_1^\top + \bar{\mathcal{Y}}_2, \\ \bar{\mathcal{E}}_{13} &= \bar{\mathcal{X}}_3 - 2\bar{\mathcal{Y}}_1^\top + \bar{\mathcal{Y}}_3, \\ \bar{\mathcal{E}}_{22} &= -\bar{\mathcal{X}}_2 - \bar{\mathcal{X}}_2^\top + \bar{\mathcal{Y}}_2 + \bar{\mathcal{Y}}_2^\top, \\ \bar{\mathcal{E}}_{23} &= -\bar{\mathcal{X}}_3 - 2\bar{\mathcal{Y}}_2^\top + \bar{\mathcal{Y}}_3, \\ \bar{\mathcal{E}}_{33} &= -2\bar{\mathcal{Y}}_3 + \bar{\mathcal{Y}}_3^\top, \end{aligned}$$

则:

1) 在含记忆时滞模糊滑模控制器 (36) 作用下, 滑模运动 (44) 渐近稳定且满足 H_∞ 指标 (31);

2) 控制增益 $K_{1j} = \bar{K}_{1j} \bar{P}^{-1}$, $K_{2j} = \bar{K}_{2j} \bar{P}^{-1}$.

证明 构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$V(\tilde{x}_t) = \tilde{x}^\top(t) P \tilde{x}(t) + \int_{t-\tau}^t \tilde{x}^\top(v) Q \tilde{x}(v) dv + \tau \int_{-\tau}^0 \int_{t+v}^t \dot{\tilde{x}}^\top(s) R \dot{\tilde{x}}(s) ds dv. \quad (46)$$

其中: $P > 0, Q > 0, R > 0$. $V(\tilde{x}_t)$ 沿着闭环系统 (44) 关于时间变量求导, 可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}_t) &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{kj}(t) \left[\alpha^\top(t) \Pi_1 \alpha(t) + \tau^2 \dot{\tilde{x}}^\top(t) R \dot{\tilde{x}}(t) + 2\alpha^\top(t) E_1^\top P \hat{D}_i w_m(t) - \tau \int_{t-\tau}^t \dot{\tilde{x}}^\top(s) R \dot{\tilde{x}}(s) ds \right]. \end{aligned} \quad (47)$$

其中

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= E_1^\top (P \tilde{A}_i + \tilde{A}_i^\top P - P \tilde{B} K_{1j} - K_{1j}^\top \tilde{B}^\top P + Q) E_1 - E_2^\top Q E_2 - E_1^\top (P \tilde{B} K_{1j} - K_{1j}^\top \tilde{B}^\top P) E_2. \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & \tau[E_1^T \Xi_{11} E_1 + E_1^T (\Xi_{12} + \Xi_{12}^T) E_2 + E_2^T \Xi_{22} E_2 + \\ & E_1^T (\Xi_{13} + \Xi_{13}^T) E_3 + E_2^T (\Xi_{23} + \Xi_{23}^T) E_3 + E_3^T \Xi_{33} E_3], \\ \Pi_3 = & (\Psi^{15})^T R^{-1} \Psi^{15} + (\Psi^{16})^T (3R)^{-1} \Psi^{16}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi^{15} = & \tau(E_1^T \mathcal{X}_1^T + E_2^T \mathcal{X}_2^T + E_3^T \mathcal{X}_3^T), \\ \Psi^{16} = & \tau(E_1^T \mathcal{Y}_1^T + E_2^T \mathcal{Y}_2^T + E_3^T \mathcal{Y}_3^T), \\ \mathcal{X}_i, \mathcal{Y}_i \in & \mathbb{R}^{n \times n}. \end{aligned}$$

于是,由引理 1,可得到

$$-\tau \int_{t-\tau}^t \dot{\hat{x}}^T(s) R \dot{\hat{x}}(s) ds \leq \alpha^T(t) (\Pi_2 + \Pi_3) \alpha(t). \quad (48)$$

令

$$\begin{aligned} \psi(t) = & \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ w_m(t) \end{bmatrix}, \quad \Omega_0 = \begin{bmatrix} \Omega_0^1 & \Omega_0^2 \\ * & 0 \end{bmatrix}, \\ \Omega_1 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ * & \gamma^2 \end{bmatrix}, \quad \Omega_2 = \begin{bmatrix} E_1^T C_\eta^T \\ E_\eta^T \end{bmatrix}, \\ \Omega_3 = & \begin{bmatrix} \Psi_{ij}^{13} \\ \tau \hat{D}_i^T R \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega_0^1 = & \Psi_{ij}^{11} + \Pi_3, \quad \Omega_0^2 = E_1^T P \hat{D}_i; \\ \Psi_{ij}^{11} = & \Pi_1 + \Pi_2, \\ \Psi_{ij}^{13} = & \tau(E_1^T \tilde{A}_i^T - E_1^T K_{1j}^T \tilde{B}^T - E_2^T K_{2j}^T \tilde{B}^T) R. \end{aligned}$$

于是,由式 (31)、(47) 和 (48),可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}_t) + \eta^T(t) \eta(t) - \gamma^2 w_m^T(t) w_m(t) \leq \\ \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t) \alpha^T(t) \Omega \alpha(t), \end{aligned} \quad (49)$$

其中 $\Omega = \Omega_0 + \Omega_1 + \Omega_2 \Omega_2^T + \Omega_3 R^{-1} \Omega_3^T$.

注意到,式 (45) 等价于如下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ij}^{11} & E_1^T \hat{D}_i & \Psi_{ij}^{13} & E_1^T C_\eta^T & \Psi^{15} & \Psi^{16} \\ * & -\gamma^2 I & \tau \hat{D}_i^T & E_\eta^T & 0 & 0 \\ * & * & -R & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -R & 0 \\ * & * & * & * & * & -3R \end{bmatrix} < 0. \quad (50)$$

根据舒尔补定理,若不等式 (50) 成立,则 $\Omega < 0$,进而,有

$$\dot{V}(\tilde{x}_t) + \eta^T(t) \eta(t) - \gamma^2 w_m^T(t) w_m(t) < 0, \quad (51)$$

亦即系统的 H_∞ 性能指标 (31) 成立.同时,由不等式 (50),可直接得到

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ij}^{11} & \Psi_{ij}^{13} & \Psi^{15} & \Psi^{16} \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -R & 0 \\ * & * & * & -3R \end{bmatrix} < 0. \quad (52)$$

进而,根据舒尔补定理,可得到

$$\Pi_4 := \Psi_{ij}^{11} + \Psi_{ij}^{13} R^{-1} (\Psi_{ij}^{13})^T + \Pi_3 < 0.$$

进一步地,易得到

$$\dot{V}(\tilde{x}_t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t) \alpha^T(t) \Pi_4 \alpha(t) < 0. \quad (53)$$

这表明闭环系统 (44) 是渐近稳定的.

注意到, $\Omega < 0$ 等价于 $\Lambda \Omega \Lambda^T < 0$, 其中 $\Lambda = \text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, I, R^{-1}, I, P^{-1}, P^{-1}\}$. 令 $\bar{P} = P^{-1}$, $\bar{Q} = P^{-1} Q P^{-1}$, $\bar{R} = P^{-1} R P^{-1}$, $\bar{\mathcal{X}}_i = P^{-1} \mathcal{X}_i P^{-1}$, $\bar{\mathcal{Y}}_i = P^{-1} \mathcal{Y}_i P^{-1}$, 则由式 (50),可直接得到式 (45); 进而,控制器增益矩阵 K_{1j} 和 K_{2j} 可直接求解. \square

注 3 为求解增益矩阵 K_{1j} 和 K_{2j} , 利用不等式 $-\bar{P} \bar{R}^{-1} \bar{P} \leq -2\bar{P} + \bar{R}$ 可直接将非线性矩阵不等式 (45) 转换为线性矩阵不等式. 同时,为求解得到合适大小的增益控制,引入如下约束条件:

$$\begin{bmatrix} -\mu_1 I & K_{1j}^T \\ * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} -\mu_2 I & K_{2j}^T \\ * & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (54)$$

注 4 为减小滑模抖振问题,反冲控制器 (36) 可进一步改写为

$$u(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t) (u_{1j}(t) + u_N(t)), \quad (55)$$

其中

$$u_N(t) = -(\rho + \hat{f} + \varpi \|\tilde{B}^\dagger \tilde{D}_{wi}\|) s(t) / (s(t) + \iota).$$

这里: $\rho > 0, \iota > 0$.

注 5 式 (55) 中,令时滞 $\tau = 0$,则可得到如下模糊滑模反冲控制律:

$$u_{2j}(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(t) (u_{2j}^* + \tilde{u}_N(t)). \quad (56)$$

其中

$$u_{2j}^* = -K_{xj} x(t) - K_{w_j} \hat{w}_m(t),$$

$$\tilde{u}_N(t) = -(\rho + \hat{f} + \varpi \|\tilde{B}^\dagger \tilde{D}_{wi}\|) \tilde{s}(t) / (\tilde{s}(t) + \iota),$$

$$\tilde{s}(t) = \tilde{B}^\dagger \left\{ \tilde{x}(t) - \tilde{x}_0 - \int_0^t \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij}(s) (\tilde{A}_i \tilde{x}(s) + \tilde{B} u_{2j}(s) + \tilde{D}_{wi} \hat{w}_m(s)) ds \right\},$$

增益矩阵 $K_{xj} = \bar{K}_{xj} \bar{P}^{-1}$, 且 \bar{K}_{xj} 和 \bar{P} 满足

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_i \tilde{P} + \tilde{P} \tilde{A}_i^T - \tilde{B} \tilde{K}_{x_j} - \tilde{K}_{x_j}^T \tilde{B}^T & \hat{D}_i & \tilde{P} C_\eta^T \\ * & -\gamma^2 I & E_\eta^T \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{57}$$

3 仿真实证

为表明所设计隔水管反冲控制方法的有效性, 隔水管-张紧器系统主要参数选自文献 [19]. 其中: 隔水管系统的伸缩接头、浮力接头和 LMRP 的干重分别为 28 082 kg、23 366 kg 和 129 496 kg, 湿重分别为 25 974 kg、2 165 kg 和 120 000 kg; 高压空气容器的体积和压强分别为 4.280 0 m³ 和 3.05 × 10⁵ Pa, 低压氮气容器的体积和压强分别为 2.25 m³ 和 1.5 × 10⁵ Pa; 隔水管的液压直径 $D_e = 0.4826$ m, 钻井泥浆的密度和摩擦系数分别为 $\rho_m = 1 537$ kg/m³ 和 $c_m = 0.004$, 海水的密度和摩擦系数分别为 $\rho_w = 1 025$ kg/m³ 和 $c_w = 0.002$. 基于上述参数可计算得到系统的相关系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -47.77 & -0.57 & 46.97 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 51.00 & 0.14 & -102.01 & -0.31 & 51.00 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 36.54 & 0.12 & -36.54 & -0.12 \end{bmatrix},$$

$$B = -D_n = -10^{-6} \times [0 \ 2.81 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$D_h = -10^{-6} \times [0 \ 2.81 \ 0 \ 3.05]^T,$$

$$D_w = [0 \ 0.80 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

系统的平衡态和初始态分别为

$$z_e = [4.26 \ 0 \ 4.15 \ 0 \ 4.24 \ 0]^T,$$

$$x_0 = -[4.26 \ 0 \ 4.33 \ 0 \ 4.40 \ 0]^T.$$

平台升沉扰动 $w_m(t)$ 的辨识模型 (12) 中: $s = 2$, $\tilde{a}_1 = 0.3404$, $\omega_1 = 0.9500$, $\theta_1 = -1.6264$, $\tilde{a}_2 =$

0.2763, $\omega_2 = 0.8100$, $\theta_2 = -1.0437$; 外系统 (14) 初始状态为

$\varphi_0 = -[0.9985 \ 0.8643 \ 0.0528 \ -0.4075]^T$; 给定升沉观测器极点为 $-1 \pm i$ 和 $-0.7 \pm 0.7i$, 于是, 可得到观测器增益矩阵

$$L_w = -[1.9791 \ 8.2291 \ 2.9135 \ -1.0147]^T,$$

平台升沉 $w_m(t)$ 的曲线如图 2 所示.

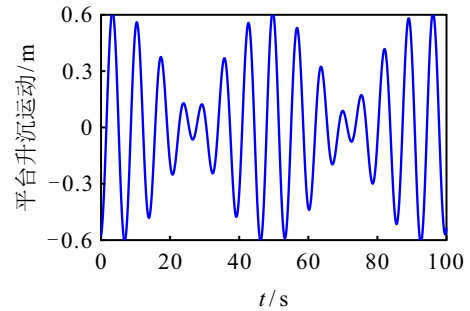


图2 平台随机升沉运动

为求解钻井下泄液粘滞摩擦阻力 $h(t)$, 其外系统 (20) 参数矩阵中: $\lambda_0 = -0.19$, $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 327.586$, $\lambda_3 = 10 702.198$, $\lambda_4 = 3 440.657$, $\lambda_5 = -170.839$ 和 $\lambda_6 = 5.86$, 钻井下泄液黏滞阻力曲线由图 3 所示.

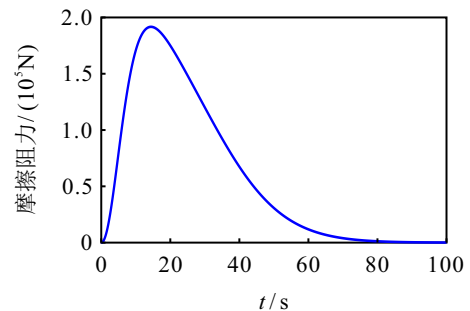
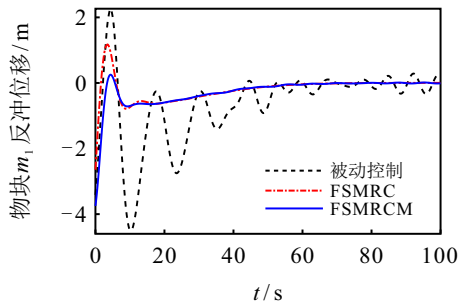


图3 钻井液下泄摩擦阻力

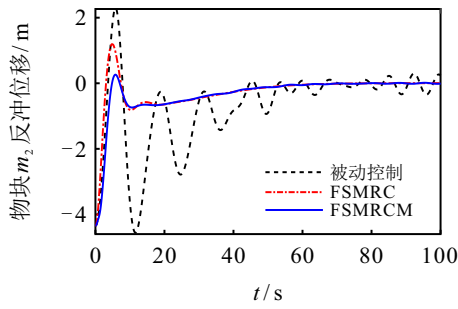
隔水管反冲控制系统模型中: 令非线性部分

表1 FSMRC 和 FSMRCM 的增益矩阵

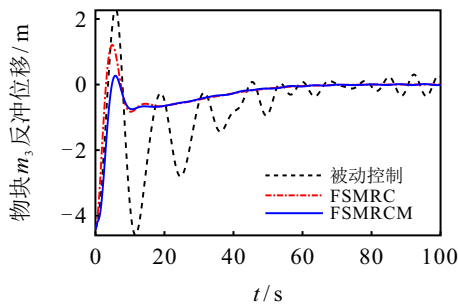
控制器	控制增益 $K_{1j} = [K_{11} \ K_{12} \ K_{13} \ K_{14}]$, $K_{2j} = [K_{21} \ K_{22} \ K_{23} \ K_{24}]$
FSMRC	$K_{11} = -10^5 \times [1.21 \ 1.28 \ 0.35 \ 1.21 \ 0.47 \ 1.71 \ -2.03 \ -0.27 \ -0.03 \ -0.01 \ 0 \ 0]$
	$K_{12} = -10^5 \times [1.21 \ 1.28 \ 0.35 \ 1.21 \ 0.47 \ 1.71 \ -2.03 \ -0.27 \ -0.03 \ -0.01 \ 0 \ 0]$
	$K_{13} = -10^5 \times [1.42 \ 1.50 \ 0.46 \ 1.40 \ 0.61 \ 1.97 \ -1.48 \ -0.21 \ -0.05 \ -0.01 \ 0 \ 0]$
	$K_{14} = -10^5 \times [1.42 \ 1.50 \ 0.46 \ 1.40 \ 0.61 \ 1.97 \ -1.48 \ -0.21 \ -0.05 \ -0.01 \ 0 \ 0]$
FSMRCM	$K_{11} = -10^7 \times [-2.04 \ 0.52 \ 1.99 \ -1.12 \ 0.01 \ 0.59 \ 0.01 \ 0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{12} = -10^7 \times [-2.04 \ 0.52 \ 1.99 \ -1.12 \ 0.01 \ 0.59 \ 0.01 \ 0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{13} = -10^7 \times [-1.90 \ 0.53 \ 1.72 \ -1.13 \ 0.17 \ 0.58 \ 0.01 \ 0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{14} = -10^7 \times [-1.90 \ 0.53 \ 1.72 \ -1.13 \ 0.17 \ 0.58 \ 0.01 \ 0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{21} = -10^6 \times [0.62 \ 0.09 \ -1.37 \ 0.01 \ 0.76 \ 0.01 \ -0.02 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{22} = -10^6 \times [0.62 \ 0.09 \ -1.37 \ 0.01 \ 0.76 \ 0.01 \ -0.02 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{23} = -10^6 \times [0.69 \ 0.10 \ -1.49 \ 0.01 \ 0.81 \ 0.01 \ -0.02 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
	$K_{24} = -10^6 \times [0.69 \ 0.10 \ -1.49 \ 0.01 \ 0.81 \ 0.01 \ -0.02 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$



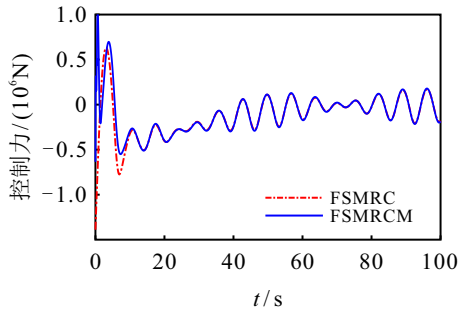
(a) m_1 反冲位移



(b) m_2 反冲位移



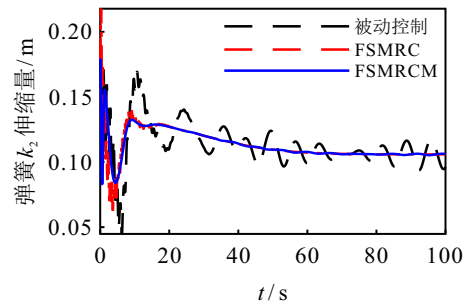
(c) m_3 反冲位移



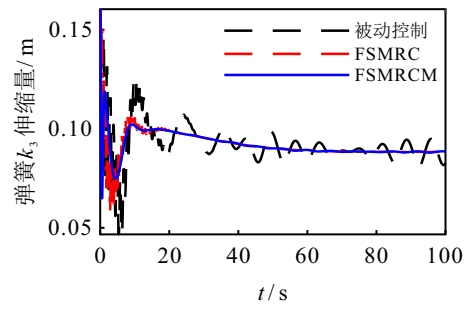
(d) 反冲控制力

图4 被动控制、FSMRC 和 FSMRCM 作用下隔水管反冲响应

$n_2(x, w) = -0.05 + 0.1\tilde{r}(t)$, 输入扰动 $\nu(t) = -500 + 1000\tilde{r}(t)$; 未建模扰动 $r(t) = -0.06 + 0.12\tilde{r}(t)$; 平台升降的有界部分 $w_n(t) = -0.02 + 0.04\tilde{r}(t)$, 其中 $\tilde{r}(t)$ 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机函数. 易得到模糊前



(a) 弹簧 k_2 伸缩量



(b) 弹簧 k_3 伸缩量

图5 弹簧 k_2 和弹簧 k_3 伸缩量

件变量 $k_x(t)$ 和 $k_w(t)$ 分别满足 $-1.3241 \times 10^5 \leq k_x(t) \leq 1.2756 \times 10^4$, $-2.2002 \times 10^4 \leq k_w(t) \leq 3.5807 \times 10^5$; 令 $\gamma = 0.90$, $\mu_1 = 5 \times 10^8$, $\mu_2 = 6.5 \times 10^8$.

3.1 含记忆模糊滑模控制器有效性验证

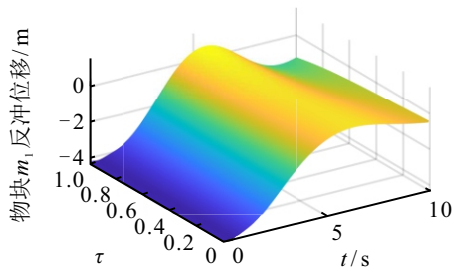
为表明不同反冲控制器作用下的隔水管反冲响应特性, 本文引入 \bar{x}_m 、 \bar{x}_M 和 u_r 等 3 个指标分别表征质量块反冲响应谷值和峰值的平均值以及反冲控制力的均方根值.

为比较起见, 通过求解矩阵不等式 (57) 和 (45), 分别得到模糊滑模反冲控制器 (FSMRC) 和含记忆模糊滑模反冲控制器 (FSMRCM). 其中: FSMRCM 对应的时滞为系统可允许引入的最大时滞 $\tau = 0.42$ s; FSMRC 和 FSMRCM 的增益矩阵 $K_{wj} = -10^5 \times [2.63 \ 6.42 \ 2.63 \ 6.42]$, K_{1j} 和 K_{2j} ($j = 1, 2, 3, 4$) 由表 1 给出.

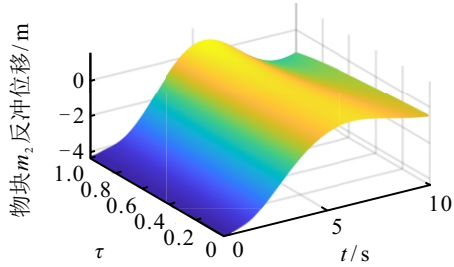
当被动控制器、FSMRC 和 FSMRCM 分别作用于隔水管反冲控制系统时, 隔水管 3 个质量块的位移反冲响应曲线以及反冲控制力曲线如图 4 所示, 隔水管等效弹簧伸缩量的仿真曲线如图 5 所示. 不同控制器作用下隔水管系统的反冲峰值、谷值以及控制力均方根值如表 2 所示. 由图 4、图 5 和表 2 可

表2 不同控制器作用下隔水管系统的反冲峰值、谷值以及控制力均方根值

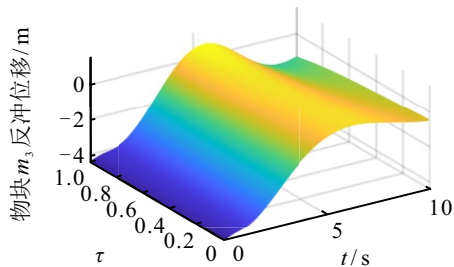
控制器	质量块 m_1 /m		质量块 m_2 /m		质量块 m_3 /m		$u_r/(10^6\text{N})$
	\bar{x}_1	\hat{x}_1	\bar{x}_2	\hat{x}_2	\bar{x}_3	\hat{x}_3	
被动控制	-4.4970	2.2638	-4.5544	2.3012	-4.5888	2.3156	-
FSMRC	-0.7891	1.1730	-0.8162	1.1925	-0.8295	1.2088	2.5703
FSMRCM	-0.7144	0.2506	-0.7387	0.2604	-0.7512	0.2673	2.3732



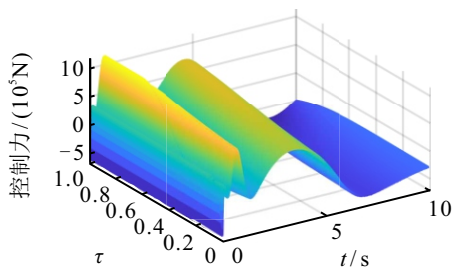
(a) FSMRCMs作用下 m_1 反冲响应峰值



(b) FSMRCMs作用下 m_2 反冲响应峰值



(c) FSMRCMs作用下 m_3 反冲响应峰值



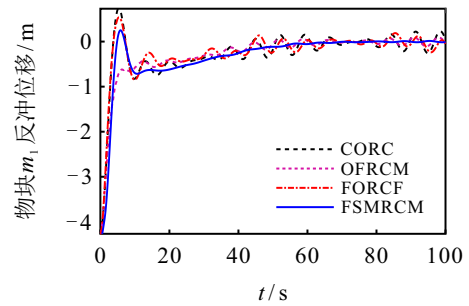
(d) FSMRCMs控制力

图6 FSMRCMs作用下隔水管反冲响应峰值及控制力

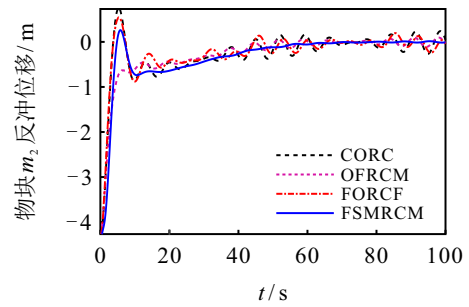
以清楚地看到,与被动控制的情形相比,在FSMRC和FSMRCM的作用下,隔水管3个质量块的位移反冲幅值均得到了有效抑制,且隔水管无压缩变形的情形.特别地,与FSMRC相比,FSMRCM只需要较小的控制力便可获得更好的反冲抑制效果.事实上,在FSMRC和FSMRCM作用下,隔水管3个质量块的平均反冲峰值分别降低至被动控制情形下的51.94%和11.31%,但是,后者所需要的控制力均方根值比前者减少了7.7%,这表明了在控制通道引入适当大小的时滞可有效抑制隔水管的反冲响应.

3.2 含记忆模糊滑模反冲控制器的进一步分析

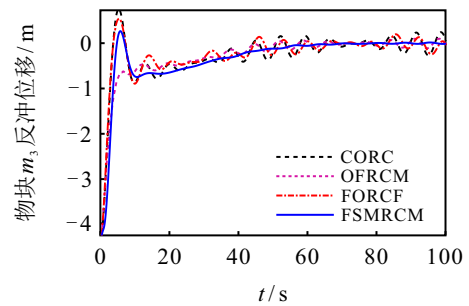
为进一步表明所提出含记忆模糊滑模反冲控制



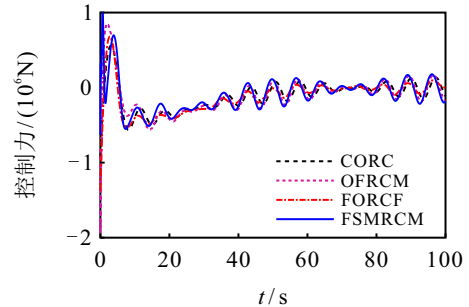
(a) 质量块 m_1 反冲位移



(b) 质量块 m_2 反冲位移



(c) 质量块 m_3 反冲位移



(d) 反冲控制力

图7 CORC、OFRCM、FORCF和FSMRCM作用下隔水管反冲响应

方法的有效性,当引入时滞 τ 从0.01 s以步长0.01逐渐增大至1.00 s时,本文分别设计对应100个时滞值的含记忆模糊滑模控制器,其增益矩阵在此省略.图6为在上述反冲控制器作用下隔水管3个质量块位移反冲峰值和控制力在前10 s的变化曲线.由图6可见:当引入时滞较小时,反冲的峰值较小;反之,当时滞较大时,系统的位移峰值则较大.

下面给出所设计FSMRCM与最优反冲控制器(CORC)^[19]、含记忆输出反馈反冲控制器(OFRCM)^[25]

和具有前馈补偿的模糊最优反冲控制器 (FORCF)^[17] 的比较结果. 为了尽可能表明不同控制器在相近控制力条件下的反冲抑制效果, 本文在设计 CORC 和 FORCF 时, 二次性能指标的权重矩阵 Q 和 R 取值如下: $Q = [Q_1, Q_2]$, $R = 1.9 \times 10^{-5}$. 其中: $Q_1 = 10^4 \times \text{diag}\{150, 1, 150, 1, 150, 1\}$, $Q_2 = 10^3 \times \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$, 给定 OFRCM 的时滞下界 $\tau_1 = 0.01 \text{ s}$, 上界 $\tau_2 = 0.05 \text{ s}$. 当上述 4 个反冲控制器作用于隔水管系统时, 图 7 给出了隔水管 3 个质量块的位移反冲响应曲线和控制力曲线. 由图 7 可见, 上述反冲控制器均能够显著抑制反冲响应位移, 但是, FSMRCM 在反冲峰值、谷值方面优于 CORC、OFRCM 与 FORCF. 事实上, CORC 和 OFRCM 均是基于简化的线性模型而设计的反冲控制器, 当它们作用于非线性模型时, 其反冲抑制能力将必然下降, 表明了建立隔水管较精确反冲动力学模型的重要性. 同时, FORCF 和 FSMRCM 均基于非线性模型设计并采用前馈-反馈机制补偿平台升沉运动对反冲响应的影响, 但是, 前馈补偿机制只能在一定程度上减弱扰动的影响, 而无法完全消除. 然而, 所设计 FSMRCM 采用的模糊滑模控制方法能够显著抑制平台升沉对于隔水管的反冲响应, 使得系统获得更理想的暂态和稳态性能.

4 结 论

首先, 本文提出了隔水管-张紧器耦合反冲系统的更一般化模型, 进而给出了系统的 T-S 模糊增广反冲动力学模型; 然后, 提出了一种基于平台升沉扰动观测器的含记忆模糊滑模反冲控制方法, 给出了含记忆模糊滑模反冲控制器的存在条件及其求解方法; 最后, 基于仿真验证了所提出反冲控制器的有效性和优越性. 仿真结果表明, 相较于模糊滑模控制器以及已有的若干反冲控制器, 通过人为引入时滞到控制通道设计的含记忆模糊滑模控制器在抑制隔水管反冲响应幅值和减小反冲控制力方面具有更好的优势.

参考文献 (References)

[1] Gronevik A. Simulation of drilling riser disconnection-recoil analysis[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013.

[2] 高德利, 王宴滨. 海洋深水钻井力学与控制技术若干研究进展[J]. 石油学报, 2019, 40(S2): 102-115. (Gao D L, Wang Y B. Some research progress in deepwater drilling mechanics and control technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 102-115.)

[3] 李朝玮, 樊洪海, 汪志明, 等. 深水钻井隔水管紧急脱离后的反冲响应[J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 121-127.

(Li C W, Fan H H, Wang Z M, et al. Recoil response of deepwater drilling riser during emergency disconnection[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(4): 121-127.)

[4] Pestana R G, Roveri F E, Franciss R, et al. Marine riser emergency disconnection analysis using scalar elements for tensioner modelling[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 83-92.

[5] Wang Y B, Gao D L, Fang J. Coupled dynamic analysis of deepwater drilling riser under combined forcing and parametric excitation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 1739-1747.

[6] Liu J, Zhao H L, Liu Q Y, et al. Dynamic behavior of a deepwater hard suspension riser under emergency evacuation conditions[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 138-151.

[7] Li M J, Gao P, Zhang J L, et al. Study on the system design and control method of a semi-active heave compensation system[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(1): 43-55.

[8] Wang Y B, Gao D L. Influence of the damping matrix and mud discharge on the recoil response of deepwater drilling riser after emergency disconnection[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108591.

[9] Young R D, Hock C J, Karlson G, et al. Analysis and design of anti-recoil system for emergency disconnect of a deepwater riser: Case study[C]. Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, 1992: 183-192.

[10] Meng S, Che C D, Zhang W J. Discharging flow effect on the recoil response of a deep-water drilling riser after an emergency disconnect[J]. Ocean Engineering, 2018, 151: 199-205.

[11] Wang X L, Liu X Q, Zhang S Y, et al. Study on mud discharge after emergency disconnection of deepwater drilling risers[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 190: 107105.

[12] Li C W, Fan H H, Wang Z M, et al. Two methods for simulating mud discharge after emergency disconnection of a drilling riser[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28: 142-152.

[13] Wang Y B, Gao D L. Recoil analysis of deepwater drilling riser after emergency disconnection[J]. Ocean Engineering, 2019, 189: 106406.

[14] Zhang W, Zhang B L, Han Q L, et al. Observer-based dynamic optimal recoil controller design for deepwater drilling riser systems[J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113324.

[15] Meng S, Chen Y, Che C D. Coupling effects of a deepwater drilling riser and the platform and the discharging fluid column in an emergency disconnect scenario[J]. China Ocean Engineering, 2020, 34(1): 21-29.

[16] Yu H Y, Zhao Y D, Zhang B L, et al. Disturbance observer-based composite recoil controller design for deepwater drilling riser systems after emergency disconnection[J]. Ocean Engineering, 2025, 329:

- 121108.
- [17] Zhang B L, Guo Y T, Han Q L, et al. Extended state-based finite-time fuzzy optimal recoil control for nonlinear drilling riser systems after emergency disconnection[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 300: 117474.
- [18] Zhang B L, Sun Y T, Zhao Y D, et al. Discrete recoil control system modelling and optimal recoil damping of deepwater drilling riser systems[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 300: 117429.
- [19] Liu X Q, Liu Z W, Wang X L, et al. Recoil control of deepwater drilling riser system based on optimal control theory[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108473.
- [20] Zhao Y D, Sun Y T, Zhang B L, et al. Recoil control of deepwater drilling riser systems via optimal control with feedforward mechanisms[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111690.
- [21] Zhang Y, Zhang B L, Han Q L, et al. Adaptive learning-based recoil control for deepwater drilling riser systems[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115920.
- [22] Zhang X M, Han Q L, Ge X H, et al. Delay-variation-dependent criteria on extended dissipativity for discrete-time neural networks with time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 34(3): 1578-1587.
- [23] Zhang X M, Han Q L, Zeng Z G. Hierarchical type stability criteria for delayed neural networks via canonical Bessel-Legendre inequalities[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(5): 1660-1671.
- [24] 李旭光, 张颖伟, 冯琳. 时滞系统的完全稳定性研究综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(7): 1153-1170.
(Li X G, Zhang Y W, Feng L. Survey on complete stability study for time-delay systems[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(7): 1153-1170.)
- [25] Zhang B L, Cai Z H, Zhang W, et al. Recoil suppression of deepwater drilling riser systems via static output feedback control with memory[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271: 113691.
- [26] Zhang W, Zhang B L, Han Q L, et al. Recoil attenuation for deepwater drilling riser systems via delayed H_∞ control[J]. *ISA Transactions*, 2023, 133: 248-261.
- [27] 周坤, 齐淑楠, 黄天民, 等. 含状态和输入时滞的模糊系统的隶属函数依赖的稳定与镇定[J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1819-1830.
(Zhou K, Qi S N, Huang T M, et al. Membership-function-dependent stability and stabilization for fuzzy systems with state and input delays[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(9): 1819-1830.)
- [28] 刘陆, 丁世宏, 李世华. 高阶滑模控制理论综述[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(12): 2193-2201.
(Liu L, Ding S H, Li S H. A survey for high-order sliding mode control theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(12): 2193-2201.)
- [29] 李习康, 许璟, 牛玉刚, 等. 基于指数保性能的比例-积分-时滞滑模观测器设计[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1267-1272.
(Li X K, Xu J, Niu Y G, et al. Design of proportional-integral-retarded sliding mode observer based on exponential guarantee performance[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(4): 1267-1272.)
- [30] 康庄, 贾利民, 秦勇. 一种新的模糊滑模控制器设计方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 1909-1917.
(Kang Z, Jia L M, Qin Y. A new design method of fuzzy sliding mode controller[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(6): 1909-1917.)
- [31] Leng J X, Xu C G, Li M, et al. Control strategy for performing predictions for a semi-active compensation system[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109816.
- [32] 刘毅, 梅玉鹏, 李国燕, 等. 基于 T-S 模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 H_∞ 控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1087-1094.
(Liu Y, Mei Y P, Li G Y, et al. Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(5): 1087-1094.)
- [33] Moulay E, Perruquetti W. Finite time stability and stabilization of a class of continuous systems[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2006, 323(2): 1430-1443.
- [34] Zhang B L, Cai Z H, Gao S W, et al. Delayed proportional-integral control for offshore steel jacket platforms[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(12): 6373-6387.

作者简介

鄢守祥 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为钻井隔水管反冲系统建模与控制, E-mail: yansx202209@163.com;

张宝琳 (1972-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为智能无人系统、隔水管反冲系统建模与控制, E-mail: zhangbl2006@163.com;

赵艳东 (1976-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为海洋钻井隔水管反冲控制、工业过程智能控制, E-mail: ydzhao@qust.edu.cn.