

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209115

## 含有未知扰动的阀控电液回转系统 MFA-SM 控制\*

熊治敏<sup>1</sup> 林娜<sup>1</sup> 池荣虎<sup>1</sup> 李学强<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266100; 2. 中特科技工业(青岛)有限公司 青岛 266041)

**摘要:** 针对阀控电液回转系统在围岩钻进过程中, 由于参数不确定、未知负载以及外部扰动等非线性因素影响难以精确控制输出轴转速的问题, 设计了基于 RBFNN 扰动观测器的 MFA-SM 控制方案。首先, 通过改进的动态线性化方法将电液系统等价线性化为仅与系统 I/O 数据相关的增量模型, 而未知负载及外部扰动则被合并为一个未知非线性时变项; 然后, 设计了 RBFNN 扰动观测器对该非线性项进行在线实时估计, 并根据系统的 I/O 数据来估计系统时变伪梯度参数; 最后, 给出了相应的控制器设计。仿真实验结果表明, 所设计的 MFA-SM 控制器能够对未知负载及外部干扰进行有效补偿, 相较于其他方法, 该方案使得系统调节时间缩短了约 10~15 s, 最大超调量降低了 7.4% 左右, 且转速跟踪误差能够收敛到 0。

**关键词:** 动态线性化; 无模型自适应控制; 滑模控制; 阀控电液回转系统

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## MFA-SM control for valve-controlled electro-hydraulic rotation system with unknown disturbances

Xiong Zhimin<sup>1</sup> Lin Na<sup>1</sup> Chi Ronghu<sup>1</sup> Li Xucqiang<sup>2</sup>

(1. School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science &amp; Technology, Qingdao 266100, China;

(2. ZTD Technology Industry (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266041, China)

**Abstract:** A MFA-SM control scheme based on RBFNN disturbance observer is designed to solve the problem that it is difficult to accurately control the output shaft speed of the valve-controlled electro-hydraulic rotation system during the drilling of surrounding rock due to the non-linear factors such as uncertain parameters, unknown load and external disturbance. First, an improved dynamic linearization method is used to linearize the electro-hydraulic system to an incremental model only related to the system I/O data. Unknown loads and external disturbances are combined into an unknown nonlinear time-varying term. Then, an RBFNN disturbance observer is designed to estimate the nonlinear term on-line in real time, and the time-varying pseudo-gradient parameters are estimated from the system I/O data. Finally, the corresponding controller design is given. The simulation results show that the MFA-SM controller can effectively compensate unknown load and external disturbance. Compared with other methods, this scheme shortens the system adjustment time by 10 to 15 s, reduces the maximum overshoot by about 7.4%, and the speed tracking error can converge to 0.

**Keywords:** dynamic linearization; model-free adaptive control; sliding mode control; valve-controlled electro-hydraulic rotary system

## 0 引言

如今, 随着现代工业的崛起, 电液系统因其响应快、力矩大、功率重量比大等特点在工业生产活动中起着至关重要的作用; 基于电液执行器的应用, 如工业定位系统<sup>[1]</sup>、航空航天飞行控制执行器<sup>[2]</sup>、主动悬架<sup>[3]</sup>、机器人操纵器<sup>[4]</sup>及

各种工业应用<sup>[5]</sup>。常见的电液系统原理由电机驱动油泵将液压油吸入油管, 采用比例阀控制液压油的流量与压力, 液压油流入液压马达推动蜗轮蜗杆带动锚杆实现旋转。

与伺服阀相比, 比例阀制造成本相对低廉且易于安装与控制<sup>[6]</sup>, 抗污染能力强, 为了降低电液系统成本, 同时考虑到比例阀的控制精度与响应特性都能满足大多数工业

收稿日期: 2022-03-01

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61374102, 61873139)、青岛市自主创新重大专项(21-1-2-14-zhz)资助

控制系统实际需要<sup>[7]</sup>,因此本文采用比例阀控制液压油的流量和方向。但是比例阀阀芯普遍存在死区特性从而导致存在阀芯动作不灵敏区引起阀芯换向滞后<sup>[4]</sup>。另外锚杆旋转过程中也会受到外部围岩剧烈干扰、液压油弹性模量随渗入油液的空气而变化、比例阀节流孔流量系数随雷诺数和阀口开度变化以及液压系统中存在的未建模动态,上述这些因素都使得采用比例阀实现电液系统精准控制的难度加大。

无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)是一种典型的在线数据驱动控制方法<sup>[8-9]</sup>,其不依赖精确的数学机理模型,而是在闭环系统的每一个动态工作点处建立等价的动态线性化数据模型,然后以此作为虚拟模型设计控制器,进而实现原非线性被控系统的自适应控制<sup>[9]</sup>。迄今为止, MFAC 方法已经在智能电网、四旋翼飞行器、城市交通、自动泊车、无人驾驶汽车、焊接过程等领域中得到了成功的应用<sup>[10-13]</sup>。

为避免比例阀死区特性带来的换向滞后,从而使转速输出能够迅速跟踪设定值并抑制干扰,本文采用滑模变结构控制来抑制液压系统的外部 and 内部扰动,滑模控制(sliding mode control, SMC)有其自身优点——对扰动和不确定性不敏感,使得利用其更能够满足类似于比例阀控电液系统的要求,且其本质上是一类特殊的非线性控制,对于被控系统存在的参数不确定性以及负载变化具有很强的鲁棒性。文献[14-15]都将反步滑模控制器应用于阀控电液伺服系统;文献[16]则主要针对电液系统难以建模型这一问题,设计了一种神经网络积分滑模控制,采用RBFNN(radial basis function neural network)逼近系统未知模型,然后引入分数阶积分滑模面,提出神经网络分数阶积分滑模控制;文献[17]探究了将自适应控制和终端滑模方法结合以实现位置的精确控制;文献[18]则主要是将电液系统非线性模型采用反馈动态线性化后与滑模控制相结合的控制方案。因此滑模控制这种控制算法对于无论系统是线性与非线性、选续与离散、确定与不确定性均有着良好的控制特性。

考虑到在被控系统实际运行中广泛存在的外部干扰和不确定性,其会显著影响电磁阀控液压转速跟踪效果,利用扰动观测器对这些因素进行在线估计是处理未知环境扰动的有效方法之一。文献[19]设计了一种二阶高通滤波器形式的扰动观测器用于估计扰动,采用变结构控制补偿扰动观测误差。为了使液压马达跟踪设定轨迹,文献[20]将未建模非线性摩擦和外部扰动看作总扰动设计了误差符号积分鲁棒控制器。文献[21]设计鲁棒柔顺控制器对含有关节角约束的电液机械臂实现角度控制。但以上对外部扰动的处理方式都或多或少需要系统模型及参数已知,因此对于该类精确模型参数时变和未知的系统并不适用。

基于以上分析,本文提出了基于RBFNN扰动观测器的阀控电液回转系统的MFA-SM控制方案,以实现对不

确定扰动状态下钻杆回转速度的快速跟踪。首先,建立了液压回转系统的近似机理模型。然后,给出了系统一般非线性形式表述,并利用动态线性化技术将钻杆转速跟踪的非线性系统转化为等价的偏格式动态线性化(partial form dynamic linearization, PFDL)数据模型,进而设计出基于PFDL的无模型自适应控制(PFDL-MFAC)方法,包括最优控制算法、伪梯度估计算法和伪梯度重置算法。理论分析和仿真结果表明,所提出的控制策略在主要利用钻机回转系统输入输出(I/O)数据以及系统跟踪误差值来设计控制器的前提下,能够有效的抑制系统外部扰动的影响实现转速的良好跟踪性能,具有较强的鲁棒性。

## 1 回转系统建模与问题描述

如图1所示为比例阀控电液回转系统原理图,其主要由异步三相电机、油箱、定量泵、电液比例换向阀、液压马达、滤油器、控制计算机信号和安全阀组成。该系统工作原理如下:三相异步电机驱动定量油泵每次从油箱中吸入一定量的液压油,油液通过过滤器和单向阀进入比例方向阀,控制器依据跟踪误差调整比例方向阀的驱动电流,比例电磁铁得电后推动阀芯引起比例阀的开度变化,液压油的流量和方向随之变化从而达到调节马达转速的目的,油液通过比例方向阀进入液压马达,驱动涡轮蜗杆减速机构旋转,进而带动锚杆正反转。

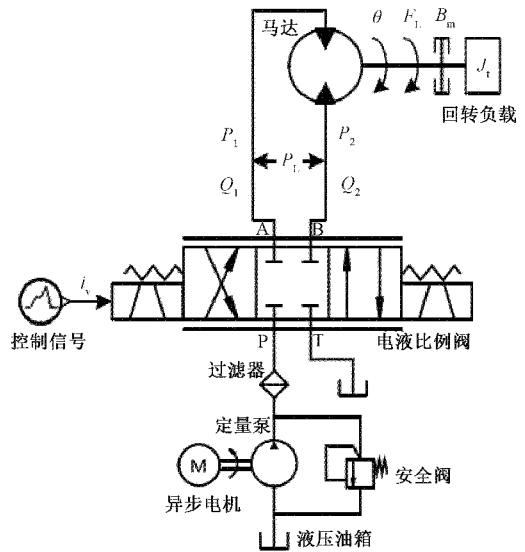


图1 比例阀控电液回转系统原理图

将电液比例阀阀芯开度与驱动电流信号的关系等价于比例环节,因此有如下表达式<sup>[22]</sup>:

$$K_{sv} = \frac{x_v}{i_v} \quad (1)$$

其中,  $K_{sv}$  为电液比例阀增益系数;  $i_v$  表示作用在比例阀上的驱动电流信号;  $x_v$  则表示电液比例阀阀芯产生的相应位移。

阀的流量-压力特性具有高度的非线性特征,传统的分析方法是将其在零位区近似线性化,显然随着阀芯工作点的变化,计算的精度必然降低。为了减小系统模型误差,这里直接应用比例阀的非线性流量-压力特性方程<sup>[22]</sup>:

$$Q_i = C_d W_v x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} \Delta P_i} \quad (2)$$

$$\Delta P_i = \begin{cases} P_s - P_i, & x_v \geq 0 \\ P_i - P_L, & x_v < 0 \end{cases}, i = 1, 2$$

式中:  $Q_i$  ( $i = 1, 2$ ) 分别表示马达进油腔与回油腔流量;  $C_d$  代表阀口流量系数;  $W_v$  表示比例阀阀芯开口面积梯度;  $P_s$  代表系统供油压力;  $P_L$  代表回油压力;  $P_1, P_2$  分别表示液压马达进油腔与回油腔压力;  $\rho$  表示液压油密度。

根据液体流量的连续性,则比例阀控液压马达的流量连续方程可以描述成<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} Q_1 = 2\pi D_m \dot{\theta} + C_{mi}(P_1 - P_2) + C_{me}P_1 + \frac{V_1}{4\beta_e} \dot{P}_1 \\ Q_2 = 2\pi D_m \dot{\theta} + C_{mi}(P_1 - P_2) - C_{me}P_2 - \frac{V_2}{4\beta_e} \dot{P}_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $D_m$  为马达的每转排量;  $\theta$  为液压马达的转角输出位移;  $\beta_e$  为液压油的有效体积弹性模量;  $C_{mi}, C_{me}$  分别为液压马达的内、外泄漏系数;  $V_1, V_2$  分别为马达进油腔与回油腔中包括马达、比例阀和管道的可控容积; 其中,  $V_1$  和  $V_2$  满足  $V_1 = V_{01} + D_m \theta, V_2 = V_{02} - D_m \theta$ ; 其中  $V_{01}$  和  $V_{02}$  分别为两腔初始容积。

**注 1:** 现阶段在阀控液压马达动态特性分析方面的研究也较为成熟。本节研究比例阀控液压马达的数学模型,该模型不仅考虑液压马达转动所需流量,还将液压马达的内、外液压油泄露和液压油压缩所需流量考虑在内,因此能精确的还原马达动态特性,使得由此推导的控制算法更具可靠性。

根据加速度定律,液压马达中旋转轴与回转负载之间的转矩平衡方程可以表示为:

$$D_m(P_1 - P_2) = J_t \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} + G_t \theta + F_L \quad (4)$$

式中:  $J_t$  为马达输出轴上的总惯性矩,包括马达力矩和转换为输出轴负载的力矩;  $B_m$  为液压马达与负载之间的黏性阻尼系数;  $G_t$  是液压马达轴总等效刚度系数;  $F_L$  是液压马达输出轴上的负载转矩。

选择液压马达的输出轴旋转角度、输出轴角速度和角加速度分别作为中间状态变量  $x_1, x_2, x_3$ , 表示为  $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$  和  $x_3 = \ddot{\theta}$ ; 选择  $y$  作为输出轴角位移变量,选择电液比例阀的驱动电流  $u_i$  作为控制输入,液压锚杆钻机回转系统可由以下状态和输出方程表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -a_1 x_1(t) - a_2 x_2(t) - a_3 x_3(t) + \\ \quad a_4 g(u_i(t)) u_i(t) - l \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中, } a_1 = \frac{4\beta_e G_t C_m}{J_t V_t}, a_2 = \frac{G_t}{J_t} + \frac{4\beta_e C_m B_m}{J_t V_t} + \frac{8\pi D_m^2}{J_t V_t},$$

$$a_3 = \frac{B_m}{J_t} + \frac{4\beta_e C_m}{V_t}, a_4 = \frac{4\beta_e C_d D_m W_v K_{sv}}{\sqrt{\rho} J_t V_t}, l = \frac{F_L}{J_t} + \frac{4\beta_e C_m F_L}{J_t V_t},$$

$$F_{Ti} = \frac{f_n(d^2 - d_0^2)f}{800}, g(u_i(t)) = \sqrt{P_s - P_{Ti} \text{sign}(K_t u_i(t))}.$$

式中:  $f_n$  表示钻头每转切削量;  $d_0$  和  $d$  分别为钻头内、外径尺寸,本文中选取  $d_0 = 8 \text{ mm}, d = 32 \text{ mm}$ ;  $f$  为岩石的硬度系数。

## 2 MFA-SM 控制器设计

### 2.1 偏格式动态线性化

令  $T$  表示系统离散采样周期,将式(5)离散化,可得:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + T x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + T x_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T(-a_1 x_1(k) - a_2 x_2(k) - \\ \quad a_3 x_3(k)) + T(a_4 g(u_i(k)) u_i(k) - l(k)) \\ y(k+1) = x_1(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

方便起见,将上式整理得到:

$$y(k+1) = b_1 y(k) + b_2 y(k-1) + b_3 y(k-2) + b_4 u_i(k) + b_5 l(k) \quad (7)$$

式中:  $b_1 = 3 - a_3 T, b_2 = 2a_3 T - a_2 T^2 - 3, b_3 = 1 + a_1 T^3 + a_2 T^2 - a_3 T, b_4 = a_4 T^3 g(u_i(k)), b_5 = -T^3$ 。

在实际系统工作过程中,系数  $b_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) 中包含的  $G_t, C_m, \beta_e, B_m, F_L$  等结构参数时变。

为了方便后续的分析,可直接将式(7)改写成下列一般非线性输入输出形式:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u_i(k), \dots, u_i(k-n_u)) + \xi(k) \quad (8)$$

其中,  $\xi(k)$  是系统有界的广义扰动,主要包含系统未知负载扰动、未建模动态以及外部扰动等等,假设其满足约束条件  $|\xi(k)| \leq D_a, D_a$  为广义扰动的上界。

参考文献[9],对非线性系统(8)做如下假设:

假设 1: 非线性函数  $f(\dots)$  对其控制输入参数  $u_i(t)$  是可微的。

假设 2: 系统(8)中非线性函数  $f(\dots)$  对任意的  $k_1, k_2, k_1 \neq k_2$ , 均满足广义 Lipschitz 条件,有:

$$\|y(k_1+1) - y(k_2+1)\| \leq L_u \|U_{i,l}(k_1) - U_{i,l}(k_2)\|$$

其中,  $L_u > 0$  是一个 Lipschitz 常数,  $\Delta U_{i,l}(k) = U_{i,l}(k) - U_{i,l}(k-1)$ 。

**注 2:** 液压钻机回转系统是一个非线性连续运动系统,其动态过程满足一定的平滑性,即满足假设 1。当输入的驱动电流在比例电磁阀允许电流范围内时,输入电流的有界变化一定不会引起比例阀阀芯开度的无穷变化。因此,假设 2 自然成立。

针对一般非线性系统式(8),在满足假设 1 和 2 的情

况下,可以得到如下动态线性化引理。

**引理 1<sup>[9]</sup>:** 对于满足假设 1 与假设 2 的非线性离散系统式(8), 当  $\|\Delta U_{i,L}(k)\| \neq 0$  时, 一定存在一个称为伪梯度(Pseudo Gradient, PG)的时变参数向量  $\phi_{p,i}(k) \in R^L$ , 使得系统式(8)可转化为偏格式动态线性化数据模型:

$$\Delta y(k+1) = \phi_{p,L}^T(k) \Delta U_{i,L}(k) \quad (9)$$

且对于任意时刻  $k, \phi_{p,i}(k) = [\phi_1(k), \phi_2(k), \dots, \phi_L(k)]^T$  总是有界的。

**证明:** 参见文献[9]。

考虑应用 RBFNN 对非线性参数  $\xi(k)$  的进行估计, 因此可将式(8)转换成:

$$y(k+1) = y(k) + \phi_{p,L}^T(k) \Delta U_{i,L}(k) + \xi(k) \quad (10)$$

### 2.2 估计未知扰动

在电液非线性简化模型式(10)中, 扰动  $\xi(k)$  是未知的。因此, 有必要构造一个扰动观测器来精确估计扰动, 下面给出了基于 RBFNN 的扰动观测器以实时在线更新扰动  $\xi(k)$  值。其中, RBFNN 拓扑结构如图 2 所示。

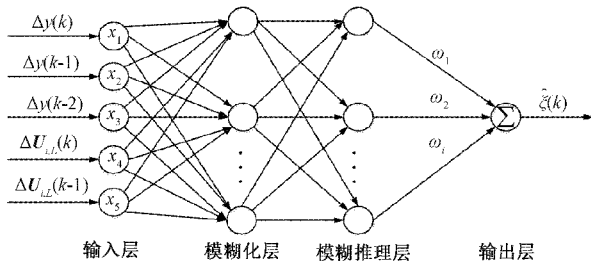


图 2 模糊 RBF 网络拓扑结构

神经网络的输入层向量为  $X = [\Delta y(k), \Delta y(k-1), \Delta y(k-2), \Delta U_{i,L}(k), \Delta U_{i,L}(k-1)]^T$ , 而模糊化层输出为:

$$f_2(i, j) = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

其中,  $C_j = [c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}]$  和  $b_j$  分别是高斯基函数的中心点坐标向量和宽度。

模糊推理层的输出为:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^n f_2(i, j) \quad (12)$$

其中,  $N = \prod_{i=1}^n N_i, N_i$  是模糊推理层节点。

网络的权重因子  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ , 因此, 模糊 RBFNN 的输出为:

$$\hat{\xi}(k) = \omega_1 f_3(1) + \omega_2 f_3(2) + \dots + \omega_n f_3(n) \quad (13)$$

考虑如下估计误差指标函数:

$$J = \frac{1}{2} \sum_k (\xi(k) - \hat{\xi}(k))^2 \quad (14)$$

利用梯度下降法可以获得以下 RBFNN 参数更新律:

$$\begin{cases} \omega_j(k) = \omega_j(k-1) + \alpha [\xi(k) - \hat{\xi}(k)] f_3(j) + \beta [\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)] \\ \Delta b_j(k) = -[\xi(k) - \hat{\xi}(k)] \omega_j f_3(j) \frac{2(x_i - c_{ij})^2}{b_j^3} \\ b_j(k) = b_j(k-1) + \alpha \Delta b_j(k) + \beta [b_j(k-1) - b_j(k-2)] \\ \Delta C_j(k) = [\xi(k) - \hat{\xi}(k)] \omega_j f_3(j) \frac{2(x_i - c_{ij})}{b_j^2} \\ C_j(k) = C_j(k-1) + \alpha \Delta C_j(k) + \beta [C_j(k-1) - C_j(k-2)] \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别是学习步长和动量因子。

因此, 式(10)可进一步重写成

$$y(k+1) = y(k) + \phi_{p,L}^T(k) \Delta U_{i,L}(k) + \hat{\xi}(k) \quad (16)$$

### 2.3 控制器设计

#### 1) MFA 控制器设计

考虑如下最优控制输入准则函数:

$$J(u_i(k)) = |y_d(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u_i(k) - u_i(k-1)|^2 \quad (17)$$

其中,  $\lambda > 0$  是一个正权重因子。

将式(9)代入准则函数式(17)中, 关于系统控制输入  $u_i(k)$  求极值, 即  $\frac{1}{2} \frac{J(u_i(k))}{\partial u_i(k)} = 0$ , 并且由于参数向量  $\phi_{p,i}(k)$  是未知的, 从而可得控制算法的表达式:

$$u_{i,MFA}(k) = u_i(k-1) + \frac{\rho_1 \hat{\phi}_1(k) (y_d(k+1) - y(k) - \hat{\xi}(k-1))}{\lambda + |\hat{\phi}_1(k)|^2} - \frac{\hat{\phi}_1(k) \sum_{i=2}^L \rho_i \hat{\phi}_i(k) \Delta u_i(k-i+1)}{\lambda + |\hat{\phi}_1(k)|^2} \quad (18)$$

其中,  $\hat{\phi}_{p,i}(k)$  是  $\phi_{p,i}(k)$  的估计值,  $\rho_i \in (0, 1], (i = 1, 2, \dots, L)$  是一个正的步长因子, 它的加入使得自适应控制算法更加灵活。

对  $\phi_{p,i}(k)$  的在线估计算法可由下列准则函数的最优解得到:

$$J(\phi_{p,i}(k)) = |\Delta y(k) - \phi_{p,i}^T(k-1) \Delta U_{i,L}(k-1) - \hat{\xi}(k-1)|^2 + \mu \|\phi_{p,i}(k) - \hat{\phi}_{p,i}(k-1)\|^2 \quad (19)$$

其中,  $\mu$  是一个正权重因子。

根据最优条件, 通过对式(19)关于  $\phi_{p,i}(k)$  求偏导数并令其等于 0, 并利用矩阵求逆引理, 可以得到伪梯度的更新算法如下:

$$\hat{\phi}_{p,i}(k) = \hat{\phi}_{p,i}(k-1) + \frac{\eta \Delta U_{i,L}(k-1) (\Delta y(k) - \hat{\xi}(k-1))}{\mu + \|\Delta U_{i,L}(k-1)\|^2} - \frac{\eta (\hat{\phi}_{p,i}^T(k-1) \Delta U_{i,L}(k-1)) \Delta U_{i,L}(k-1)}{\mu + \|\Delta U_{i,L}(k-1)\|^2} \quad (20)$$

其中,  $\eta \in (0, 2]$  是一个步长因子, 使估计算法更具通用性。

另外, 为了增强该系统控制策略中 PG 估计算法对时变参数的跟踪能力, 引入了如下的伪梯度重置算法:

$$\hat{\phi}_{p,L}(k) = \hat{\phi}_{p,L}(0) \text{ if } \|\hat{\phi}_{p,L}(k)\| \leq \epsilon \text{ or } \|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)\| \leq \epsilon$$

$$\text{or } \text{sign}(\hat{\phi}_1(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_1(0)) \quad (21)$$

其中,  $\epsilon$  是一个充分小的正常数, 因此这里一般取  $\epsilon = 10^{-5}$ 。

## 2) MFA-SM 控制器设计

针对式(8)所示系统, 设计其滑模控制器, 定义输出跟踪误差如下:

$$e(k) = y_d(k) - y(k) \quad (22)$$

其中,  $y_d(k)$  和  $y(k)$  分别是系统期望输出以及实际输出。

依赖于输出误差式(22), 定义如下的离散滑模函数:

$$s(k) = \mathbf{C}^T \mathbf{E}(k)$$

$$\mathbf{E}(k) = [e(k), e(k-1)]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{C}^T = [1, C_0]$$

式中:  $C_0$  为大于 0 的系数。

对于趋近律而言, 利用常见的离散指数趋近律, 其形式有

$$s(k+1) - s(k) = -qTs(k) - \gamma T \text{sgn}(s(k)) \quad (24)$$

结合 PFDL 线性数据模型式(9)与离散指数趋近律式(24)可得:

$$s(k+1) = e(k+1) + C_0 e(k) = y_d(k+1) - y(k+1) + C_0(y_d(k) - y(k)) = y_d(k+1) - \hat{\phi}_{p,L}^T(k) \Delta \mathbf{U}_{i,L}(k) + C_0 y_d(k) - (1 + C_0)y(k) \quad (25)$$

联合式(23)可得到其等效控制律有

$$\Delta u_{i,L,sm}(k) = \frac{1}{\hat{\phi}_{p,L}^T(k)} [y_d(k+1) + C_0 y_d(k) - (1 + C_0)y(k) - (1 - qT)s(k) + \gamma T \text{sgn}(s(k)) - \hat{\phi}_{p,L-1}^T(k) \Delta \bar{\mathbf{U}}_{i,L-1}(k)] \quad (26)$$

式中:  $\gamma > 0, 1 - qT > 0, q > 0, \hat{\phi}_{p,L-1}^T(k) = [\hat{\phi}_2(k), \hat{\phi}_3(k), \dots, \hat{\phi}_n(k)], \Delta \bar{\mathbf{U}}_{i,L-1}(k) = [\Delta u_i(k-1), \Delta u_i(k-2), \dots, \Delta u_i(k-L+1)]^T$ 。

综上, 由于滑模到达性条件是基于动态线性化, 令  $u_{sm}(k) = \Delta u_{i,L,sm}(k)$ , 将上述式(18)与(26)相加可得 MFA-SM 控制器的最终形式

$$u_{fin}(k) = \Gamma u_{i,MFA}(k) + \Delta u_{i,L,sm}(k) \quad (27)$$

其中,  $\Gamma, \Lambda > 0$  是正的加权因子, 且可用来调节跟踪误差收敛速度, 同时控制律相加也使得式(27)更加灵活; 因此本文所设计的 MFA-SM 控制方案由式(20)、(21)、(27)和 RBFNN 参数估计律式(15)4 式组成, 其控制结构框图如图 3 所示。

**注 3:** 本文采用如式(24)的离散指数趋近律方法来解决系统快速收敛的问题, 同时可以有效减弱系统抖振, 并

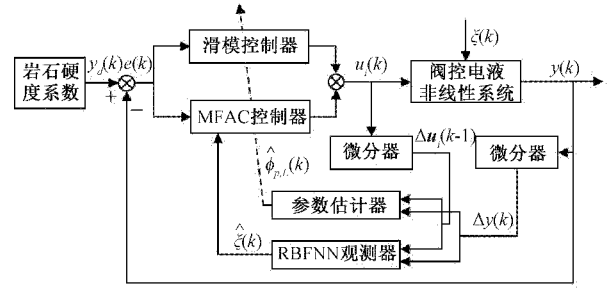


图 3 阀控电液回转系统自适应滑模控制结构

且该方法能够快速单调的向滑模面趋近, 并在有限步数内到达滑模面。

**注 4:** 将 MFAC 与滑模趋近律控制相结合, 有如下优势: 1) 保证了控制器的设计过程无须被控系统任何信息。2) 引入滑模趋近律控制, 加快了控制响应速度。3) 引入了 MFAC, 可减少滑模的抖振程度。

## 3 稳定性分析及证明

由神经网络的逼近性质有, 选取合适的网络结构和参数,  $\hat{\xi}(k)$  可以实现以任意精度逼近  $\xi(k)$ , 因此存在一个正数  $\vartheta$  使得估计误差始终小于  $\vartheta$ , 即满足

$$\max |\xi(k) - \hat{\xi}(k)| \leq \vartheta, k = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

为了严格讨论, 对阀控电液回转系统给出如下假设与稳定性定理。

**假设 3:** 对于任意时刻  $k$  及  $\|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k)\| \neq 0$ , 系统伪偏梯度  $\text{PG} \hat{\phi}_{p,L}(k)$  的符号始终保持不变。

**定理 1:** 针对非线性阀控电液回转系统(8), 在满足假设 1~3 的条件下, 如果期望信号  $y_d(k)$  为常数, 且未知负载及外部扰动满足  $|\xi(k)| \leq D_a$ , 那么利用式(20)和(21)估计时变参数  $\hat{\phi}_{p,L}(k)$ , 控制律采用式(27)所得到的 MFA-SM 控制方案能在有限步数内到达准离散滑模面, 且系统的输入  $u(k)$  和输出  $y(k)$  是有界的。

**证明 1:** 参数估计值  $\hat{\phi}_{p,L}(k)$  的有界性

考虑重置条件(21), 设定  $\hat{\phi}_{p,L}(k)$  的估计误差为  $\tilde{\phi}_{p,L}(k) = \phi_{p,L}(k) - \hat{\phi}_{p,L}(k)$ , 因此上式(20)可变换成:

$$\tilde{\phi}_{p,L}(k) = \hat{\phi}_{p,L}(k-1) + \frac{\eta \Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)}{\mu + \|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)\|^2} (\Delta y(k) - \hat{\phi}_{p,L}(k-1) \Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)) - \frac{\eta \Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)}{\mu + \|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)\|^2} \hat{\xi}(k-1) - \tilde{\phi}_{p,L}(k) \quad (29)$$

结合  $\Delta y(k) = \hat{\phi}_{p,L}^T(k-1) \Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1) + \xi(k-1)$ , 可得到:

$$\tilde{\phi}_{p,L}(k) = \hat{\phi}_{p,L}(k-1) + \frac{\eta \|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta \mathbf{U}_{i,L}(k-1)\|^2} (\phi_{p,L}(k) - \hat{\phi}_{p,L}(k-1)) +$$



$$\frac{\eta \Delta U_{i,l}(k-1)}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2} (\xi(k-1) - \hat{\xi}(k-1)) - \phi_{p,l}(k) \quad (30)$$

应用  $\tilde{\phi}_{p,l}(k-1) = \hat{\phi}_{p,l}(k-1) - \phi_{p,l}(k-1)$  整理可得到:

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{p,l}(k) &= \left(1 - \frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}\right) \tilde{\phi}_{p,l}(k-1) + \\ &\frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2} \phi_{p,l}(k-1) - \Delta \phi_{p,l}(k) + \\ &\frac{\eta \Delta U_{i,l}(k-1)}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2} (\xi(k-1) - \hat{\xi}(k-1)) \quad (31) \end{aligned}$$

对式(30)两端分别取模, 则有如下等式:

$$\begin{aligned} \|\tilde{\phi}_{p,l}(k)\| &\leq \left|1 - \frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}\right| \|\tilde{\phi}_{p,l}(k-1)\| - \\ &\|\Delta \phi_{p,l}(k)\| + \left|\frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}\right| \|\phi_{p,l}(k-1)\| + \\ &\left|\frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}\right| |\xi(k-1) - \hat{\xi}(k-1)| \quad (32) \end{aligned}$$

因为  $\eta \in (0, 1]$ ,  $\mu > 0$ , 所以  $\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2 \leq \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2 \leq \mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2$ , 并且一定存在一个正常数  $c_1$ , 使得式子  $0 < c_1 \leq \frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2} < 1$  成立。

由  $\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2 \geq 2\sqrt{\mu} \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|$  可以得到:

$$\begin{aligned} \left|\frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|}{\mu + \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|^2}\right| &\leq \left|\frac{\eta \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|}{2\sqrt{\mu} \|\Delta U_{i,l}(k-1)\|}\right| = \\ \frac{\eta}{2\sqrt{\mu}} \quad (33) \end{aligned}$$

因此由引理 1 和 RBFNN 逼近性质式(28)可将式(32)转化成如下等式:

$$\begin{aligned} \|\tilde{\phi}_{p,l}(k)\| &\leq |1 - c_1| \|\tilde{\phi}_{p,l}(k-1)\| + \\ \|\phi_{p,l}(k-1)\| + \|\Delta \phi_{p,l}(k)\| + \frac{\eta^2}{2\sqrt{\mu}} \quad (34) \end{aligned}$$

同样的, 由引理 1 可知  $\|\phi_{p,l}(k)\|$  是有界的, 假设其数值上界为  $b$ ; 那么即有  $\|\phi_{p,l}(k) - \phi_{p,l}(k-1)\| \leq 2b$ , 因此可得:

$$\begin{aligned} \|\tilde{\phi}_{p,l}(k)\| &\leq (1 - c_1) \|\tilde{\phi}_{p,l}(k-1)\| + \|\phi_{p,l}(k-1)\| + \|\Delta \phi_{p,l}(k)\| + \frac{\eta^2}{2\sqrt{\mu}} \leq (1 - c_1) \|\tilde{\phi}_{p,l}(k-1)\| + \\ 3b + \frac{\eta^2}{2\sqrt{\mu}} &\leq \dots \leq (1 - c_1)^{k-1} \|\tilde{\phi}_{p,l}(1)\| + \frac{1}{c_1} \left(3b + \frac{\eta^2}{2\sqrt{\mu}}\right) \quad (35) \end{aligned}$$

其中, 由假设 RBFNN 逼近性质可知其估计误差始终小于  $\vartheta$ , 因此式(35)意味着参数估计误差  $\tilde{\phi}_{p,l}(k)$  是有界的, 从其定义可知  $\phi_{p,l}(k)$  的有界性, 因此估计值  $\hat{\phi}_{p,l}(k)$

也是有界的。

**证明 2:** 系统跟踪误差的有界性

当动态线性化模型确定, 并且其估计参数伪梯度矩阵有界时, 无模型自适应控制律调节系统所产生的偏差可以由滑模控制律补偿, 已知系统滑模面取为:

$$\begin{aligned} s(k) &= C^T E(k) \\ E(k) &= [e(k), e(k-1)]^T \quad (36) \\ C^T &= [1, C_0] \end{aligned}$$

定义正定函数如下:

$$V(k) = [C^T E(k)]^2 + \frac{1}{\sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j)} \quad (37)$$

其中,  $\tilde{\phi}_{p,l}(k)$  是参数估计误差, 有证明 1 可得它的有界性; 由式(37)对  $V(k)$  的定义可知,  $V(k) > 0$  成立, 且

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &= V(k+1) - V(k) \sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) = \\ [C^T E(k+1)]^2 + \frac{1}{\sum_{j=1}^{k+1} \tilde{\phi}_{p,l}^2(j)} - [C^T E(k)]^2 - \frac{1}{\sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j)} = \\ ((1 - qT)C^T E(k) - \gamma T \operatorname{sgn}(C^T E(k)))^2 - [C^T E(k)]^2 + \\ \sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) - \sum_{j=1}^{k-1} \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) &= -2qT[C^T E(k)]^2 + \\ \sum_{j=1}^{k-1} \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) \cdot \sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) &= \\ q^2 T^2 [C^T E(k)]^2 - 2\gamma T(1 - qT)C^T E(k) \operatorname{sgn}(C^T E(k)) + \\ \gamma^2 - \frac{\tilde{\phi}_{p,l}^2(k+1)}{\sum_{j=1}^{k-1} \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) \cdot \sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j)} \quad (38) \end{aligned}$$

那么, 式(38)可变换成:

$$\begin{aligned} -qT(2 - qT)[C^T E(k)]^2 - \frac{\tilde{\phi}_{p,l}^2(k+1)}{\sum_{j=1}^{k-1} \tilde{\phi}_{p,l}^2(j) \cdot \sum_{j=1}^k \tilde{\phi}_{p,l}^2(j)} - \\ 2\gamma T(1 - qT)C^T E(k) \operatorname{sgn}(C^T E(k)) + \gamma^2 \quad (39) \end{aligned}$$

式(39)前 3 项数值均小于 0, 如果  $\gamma$  选取得足够小则可以使  $\Delta V(k+1) < 0$ 。这也就说明在 MFA-SM 控制律式(27)作用下, 阀控电液回转系统是渐近稳定的。

#### 4 围岩最优转速的匹配

对某一种或者某一类岩石来说, 在特定轴向进给力条件下, 存在着一个最优转速。超过该最优转速, 即使转速增大, 轴向进给速度反而会下降。有关学者 Tiberius Cove 研究表明: 针对每类特定岩石, 钻头存在一个最优转速, 且该最优转速与岩石坚固性系数和钻头内外径之差的平方根乘积成反比。因此, 液压钻机最优回转速度可表示为:

$$y_d = \frac{c}{f\sqrt{D}} \quad (40)$$

其中,  $D$  为钻头有效回转直径;  $c$  为钻头切削速度常

数,这里一般取  $c=6\ 000\sim 10\ 300\ \text{mm}\cdot\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别对应最优转速的下界与上界。

## 5 实验仿真与结果分析

为验证本文所提出的阀控电液回转系统 MFA-SM 控制方案的有效性,针对地质环境中出现的 3 种围岩渐变工况分别是泥页岩、砂质泥岩和砂岩,如表 1 所示<sup>[22]</sup>进行了仿真模拟。首先根据实际液压元器件特性得以确定钻机的电液回转系统参数,如表 2 所示<sup>[23]</sup>。在钻机运行过程中设定轴向推进力为恒定值。另外考虑系统采样周期为  $T=0.001\ \text{s}$ 。

表 1 平顶山五矿围岩强度

岩石性质	岩石硬度系数 $f$
泥页岩	5
砂质泥岩	6
砂岩	8

表 2 电磁阀控液压系统部分参数

参数	数值	参数	数值
$P_s/\text{MPa}$	16	$V_t/\text{m}^3$	$8.14\times 10^{-4}$
$C_d$	0.61	$J_t/(\text{kg}/\text{m}^2)$	2.41
$D_m/(\text{l}/\text{r})$	0.10	$W_v/(\text{m}^2/\text{m})$	$8\pi\times 10^{-3}$
$K_{sv}/(\text{m}/\Lambda)$	0.25	$B_m/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad})$	0.01
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	850	$C_m/(\text{m}^3/\text{s}/\text{MPa})$	$5.0\times 10^{-6}$
$\beta_e/\text{MPa}$	700	$G_t/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad})$	75

本文将所提的 MFAC 与基于趋近律的离散滑模控制相结合的方案与 PID 控制技术、MFAC 控制策略进行仿真比较。在系统运行过程中突加阶跃扰动,以检验所提出策略的鲁棒性。

仿真实验中, MFA-SM 控制方案各参数值选取为  $L=3, \eta=0.85, \mu=0.99, \rho=0.8, \lambda=0.0001$ , 伪梯度参数以及控制输入、输出初始值分别设置为  $\hat{\phi}_{p,L}(1)=[0, 1.0, 1.0]^T, u_i(1)=1.0, u_i(2)=1.0, u_i(3)=2.0, u_i(4)=1.0, u_i(5)=2.0; y(1)=1.0, y(2)=1.0, y(3)=2.0, y(4)=1.0, y(5)=1.0, y(6)=2.0$ ; 滑模参数  $C_0=0.5$ , 而 RBFNN 参数为  $\alpha=0.1$  和  $\beta=0.15$ , 网络节点数为 5, 其中心向量  $c=[7, 3.5, 0, -3.5, -7]$ , 高斯基函数宽度  $b=[1, 1, 1, 1, 1]^T$ , 初始权值调整到 0; 控制器加权因子  $\Gamma=\Lambda=1.0$ , 应用传统的 PID 控制律参数:  $K_p=2.5, T_i=0.8, T_d=0$ 。

扰动采用阶跃信号并在围岩岩性变化时刻突然加入。仿真结果如图 4 跟踪性能和图 5 跟踪误差所示, 由图 4 可知当岩性变化时, 所提出的 MFA-SM 控制方法相比 MFAC 控制、PID 控制能够对未知扰动进行估计并补偿, 从而有效抑制未知扰动引起的转速振荡, 其次超调量更

小, 调节时间也更短; 而从图 5 转速跟踪误差曲线可得出本文所设计的方法能够在 8 s 左右让转速重新达到稳态, 进一步说明了 RBFNN 扰动观测器以及滑模控制对未知扰动的抑制作用, 因此相较于 MFAC 控制、PID 控制, 该方法系统输出误差更小, 鲁棒性更强, 控制效果得到了改善。

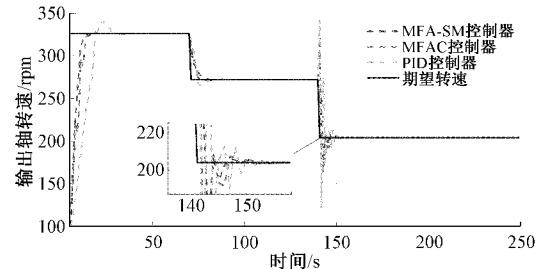


图 4 转速跟踪性能

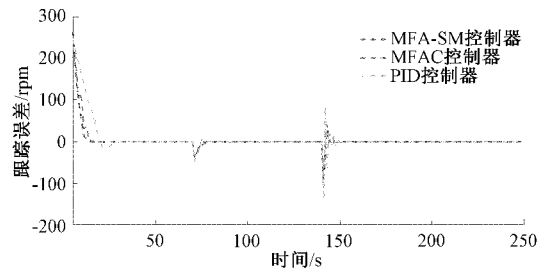


图 5 转速跟踪误差

外部阶跃扰动信号在平稳阶段第 180 s 处突然加入。仿真结果如图 6 和 7 所示分别为电液回转系统转速跟踪曲线和对期望转速的跟踪误差曲线。由图 6 可知当突加阶跃扰动信号时, 三种控制方法都有不同程度的转速超调产生。但是相比之下, 本文所提方法使得转速输出振荡更小、调节时间大大缩短、系统收敛速度更快。而图 7 误差曲线

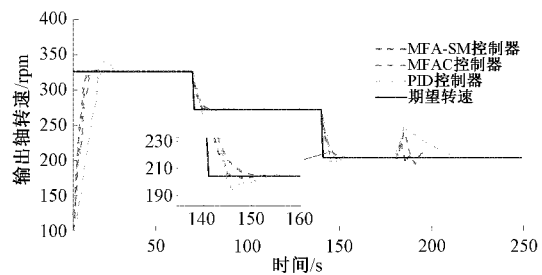


图 6 转速跟踪性能

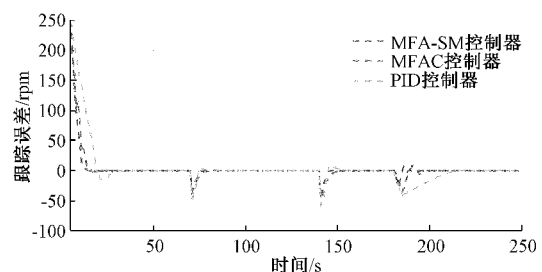


图 7 转速跟踪误差

则进一步表明了所设计控制方案的有效性。从实际应用角度出发,考虑阀控电液回转系统在实际工况下作业的复杂性,因此本文所设计的控制方案能极大提高钻机工作效率。

## 6 结 论

针对阀控电液回转系统中存在的非线性特性、时变参数、参数不确定以及难以建立精确的数学模型等问题,提出了改进的无模型自适应控制和离散滑模控制相结合的控制策略;此外,对于系统实际工况环境中的未知负载及外部扰动,设计了RBFNN扰动观测器对其进行实时在线估计。随后,证明了所提出控制策略的伪梯度参数和跟踪误差的有界性,并将该方案与PID控制技术、MFAC控制方法进行了仿真对比。结果表明,无论回转系统是在岩性变化时或者稳定阶段时受到未知外部干扰,本文提出的控制策略都能满足快速估计并补偿扰动的要求,提高了系统抗扰动能力,且无需建立精确的系统模型,同时控制精度更高、鲁棒性更强,更加符合钻机实际作业过程中对控制性能的需要。

## 参考文献

- [1] PLUMMER A R, VAUGHAN N D. Robust adaptive control for hydraulic servo systems[J]. *Journal of Dynamics System, Measures and Control*, 1996, 118(2): 237-244.
- [2] THOMPSON D F, PRUYN J S, SHUKLA A. Feedback design for robust tracking and robust stiffness in flight control actuators using a modified QFT technique[J]. *International Journal of Control*, 1999, 72(16): 1480-1497.
- [3] ANDREW A, HEDRICK J K. Nonlinear adaptive-control of active suspensions[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(1): 94-101.
- [4] MOHANTY A, YAO B. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2011, 19(3): 567-575.
- [5] 刘行行,刘复玉,李林. 基于PLC的液压控制系统在工业计量中的研究与应用[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(8):34-38,43.
- [6] 李栋,刘志刚. 基于黎曼曲面的电液伺服阀动态特性数据处理[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(12):1-5.
- [7] 苏琦. 先导式电液比例方向阀换向滞后分析及其补偿方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [8] 侯忠生,许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 650-667.
- [9] HOU Z S, JIN S T. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(6): 1549-1558.
- [10] 赵艺,陆超,韩英铎. 多输入多输出无模型自适应广域阻尼控制器设计[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(4): 453-458,464.
- [11] 余威,卜旭辉. 四旋翼无模型自适应抗干扰姿态控制器设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7): 166-172.
- [12] 池荣虎,侯忠生. 基于匝道调节的快速路交通密度的无模型周期自适应控制方法[J]. *自动化学报*, 2010, 36(7):1029-1032.
- [13] 侯忠生,董航瑞,金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制[J]. *自动化学报*, 2015, 41(4): 823-831.
- [14] 吉鑫浩,汪成文,陈帅,等. 阀控电液位置伺服系统滑模反步控制方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(6):1518-1525.
- [15] 玉洁. 电液伺服系统建模及滑模变结构控制方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2015.
- [16] 王璇. 液压位置伺服系统的智能控制[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [17] 刘启龙,韩江,杨四阳,等. 不确定电液位置伺服系统的自适应终端滑模控制[J]. *应用数学和力学*, 2021, 42(7): 675-685.
- [18] 闵磊,张洪信,赵清海,等. 电液位置伺服系统的反馈线性化滑模控制研究[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2021, 36(2): 9-14.
- [19] KIM W, SHIN D, WON D. Disturbance-observer-based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(6): 2290-2298.
- [20] YAO J Y, JIAO Z X, MA D W, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 633-641.
- [21] LEE W, YOO S, NAM S. Passivity-based robust compliance control of electro-hydraulic robot manipulators with joint angle limit[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3190-3197.
- [22] 程伟. 基于围岩感知的锚钻装备推进回转协同自适应控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [23] DENG H, LUO J H, DUAN X G, et al. Adaptive inverse control for gripper rotating system in heavy-duty manipulators with unknown dead zones[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(10): 7952-7961.

## 作者简介

熊治敏, 硕士, 主要研究方向为无模型自适应控制、数据驱动控制等。

E-mail: zhimin\_xiong@outlook.com

林娜, 博士, 主要研究方向为数据驱动控制、迭代学习控制、多智能体系统等。

E-mail: linnqingdao@163.com

池荣虎, 教授, 主要研究方向为数据驱动控制、迭代学习控制、智能交通系统等。

E-mail: rhchi@163.com

李学强, 企业法人。

E-mail: 1017179734@qq.com