基于神经网络的车载钻机给进系统级联控制方法

王云飞[1,2]，赵继云[3]，张忠海[4]，常仁齐[4]，董浩浩[3]，刁齐圣[3]

（1. 中国矿业大学 安全工程学院，江苏 徐州 221116；2. 徐州工程机械集团有限公司 高端工程机械智能制造国家重点实验室，江苏 徐州 221132；3. 中国矿业大学 机电工程学院，江苏 徐州 221116；4. 徐州徐工基础工程机械有限公司 能源装备研究院，江苏 徐州 221001）

摘 要：针对车载钻机给进系统设计了一种基于神经网络补偿的级联控制器。首先，采用全局快速终端滑模面在位置控制外环消除抖振和提高收敛速度，并设计了基于径向基函数神经网络的扰动观测器估计和补偿系统的集成扰动。然后，采用反演控制方法在压力控制内环计算整个系统的实际输入电压，并利用Lyapunov理论证明了闭环系统的稳定性。最后，通过仿真和实验进一步验证了所设计控制器的有效性。

关键词：车载钻机；神经网络；干扰观测器；级联控制；全局快速终端滑模

中图分类号：TH6 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)06-1488-11

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241243

Cascade control method for the feed system of truck-mounted drilling rig based on neural network

WANG Yun-fei[1,2], ZHAO Ji-yun[3], ZHANG Zhong-hai[4], CHANG Ren-qi[4], DONG Hao-hao[3], DIAO Qi-sheng[3]

(1. *School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 2. *State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of High-end Construction Machinery, Xuzhou Construction Machinery Group, Xuzhou* 221132, *China*; 3. *School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 4. *Energy Equipment Research Institute, XCMG Construction Machinery, Xuzhou* 221001, *China*)

Abstract: A cascade controller based on neural network compensation is designed for the feed system oftruck-mounted drilling rig. Firstly, the global fast terminal sliding mode surface is used to eliminate chattering and improve the convergence speed in the position control outer loop, and a disturbance observer based on radial basis neural network is designed to estimate and compensate the integrated disturbance of the system. Then, backstepping control is used to calculate the actual input voltage of the whole system in the inner loop of pressure control and the stability of the closed-loop system is proved by Lyapunov theory.

收稿日期：2024-11-19.

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3005900)；国家自然科学基金项目(52404268)；江苏省自然科学基金项目(BK20241640).

作者简介：王云飞(1993-)，男，副教授，博士. 研究方向：矿山机械智能化，应急救援装备研发. E-mail: yunfeiwang@cumt.edu.cn

Finally, the effectiveness of the designed controller is further verified by simulation and experiment.

Key words: truck-mounted drilling rig; neural network; disturbance observer; cascade control; global fast terminal sliding mode

0　引　言

我国矿山开采和地下工程的施工深度、强度逐年增加，使得冲击地压、地下爆炸、透水、顶板坍塌等灾害事故的风险增加。重大灾害事故会造成地层坍塌、巷道堵塞及积水等现象，导致大量地下作业人员被困灾区无法逃生。地面钻孔救援技术可实现地面与地下灾区的直接连通，进而为被困人员提供生命给养和提升救援通道，已成为新时代矿山和地下工程事故救援的一种重要手段[1]。

车载钻机是地面钻孔救援的关键设备，其工作性能直接决定地面钻孔的成孔效率与质量。由于液压传动系统具有更大的过载能力和更小的功率尺寸比，因而车载钻机给进系统选用阀控缸电液驱动系统为钻进过程提供钻速和钻压[2]。然而，电液系统的强非线性、参数不确定性和未知动力学特性严重影响了系统的控制性能。而且，地面钻孔过程要跨越多个地层，地层的不均匀性导致电液系统的负载呈现强时变性，给系统控制带来了困难[3]。

为了提高钻机在复杂工况下的钻进效率，钻机钻进系统与岩层之间的自适应控制始终是国内外学者的研究热点。Gu等[4]将煤岩钻进阻力模型与煤矿钻机钻进系统模型相结合，建立了描述钻进特性的耦合动力学模型。Guo等[5]采用参数自适应律来估计凿岩机电液系统的未知参数，采用神经网络对未建模的动力学进行补偿。Zhang等[6]针对锚杆钻机电液系统的控制死区和干扰问题设计了一种改进的非线性扩展状态观测器。朱敏等[7]搭建了锚杆钻机回转系统的状态空间模型，提出了一种基于无模型自适应迭代学习的锚杆钻机回转系统转速控制方案。姚文龙等[8]针对水井钻机电液伺服系统存在的参数不确定以及未知负载扰动突变问题，提出了基于径向基神经网络扰动观测器的无模型自适应控制方法。以上先进的控制方法有效提高了钻机与岩层的适应性，大大提高了钻进效率。

针对钻机钻进过程存在钻速/钻压切换控制的特殊工况，设计位置环和压力环组成的级联控制器是一种提高钻进系统控制性能的有效思路。郭凡等[9]设计了非线性级联控制器对液压机在慢速加压阶段的位移和压力进行复合控制。Li等[10]通过扩展干扰观测器和反演方法合成的非线性级联控制器来提高单出杆气缸位置控制精度。Han等[11]针对电动静液作动器设计了由一阶压力系统与二阶位置系统组成的级联控制器，并分别通过两个线性自抗扰控制器对压力环和位置环的系统不确定性进行估计和补偿。虽然通过级联控制器的结构，可以将系统的位置环和压力环进行合理分配，但相应的控制环仍需要先进的控制方法提高控制性能。

近年来，滑模控制因响应速度快、结构简单和物理应用方便等优点得以迅速发展，积分滑模、非奇异终端滑模、全局快速终端滑模逐渐得到实际应用。但当系统的模型参数不确定或存在较大的外部干扰时，基于滑模的控制方法精度仍然不理想。为此，国内外学者利用额外的观测器对系统扰动进行估计和补偿。比如，Wang等[12]设计了高增益干扰观测器对单出杆液压缸电液伺服系统的集成扰动进行估计。曹萌萌等[13]利用神经网络的万能逼近特性对机电作动系统的时变扰动进行估计和补偿。臧万顺等[14]设计了新型扩张滑模观测器用于估计系统状态和系统不确定性。Na等[15]提出了未知动力学估计器对包括摩擦力、负载力和电液系统参数不确定性在内的集成干扰进行估计。这些方法为进一步提高滑模控制的鲁棒性和控制精度提供了借鉴思路。

本文针对车载钻机给进系统需要提供钻速/钻压的实际需求，构建了一种由位置控制外环和压力控制内环组成的非线性级联控制器。其中，位置控制外环选用全局快速终端滑模控制，并设计了基于径向基神经网络的扰动观测器来估计和补偿强时变负载扰动，压力控制内环选用反演法计算电液控制阀的输入电压。该控制器不仅可以有效提高系统的抗干扰能力、收敛速度和位置控制精度，还可以为后续的钻速/钻压切换控制提供理论基础和实践经验。

1 问题描述

1.1 工作原理

车载钻机给进系统如图1所示。大型车载钻机上主要采用液压缸-钢丝绳驱动的方式,钢丝绳通过上、下滑轮组与动力头连接,从而将给进油缸输出的位移/力传递至钻杆。此外,给进油缸的速度无法直接测量,而是通过高度传感器对其给进位置进行测量,因此给进系统的钻速控制问题通常转换为位置控制问题。

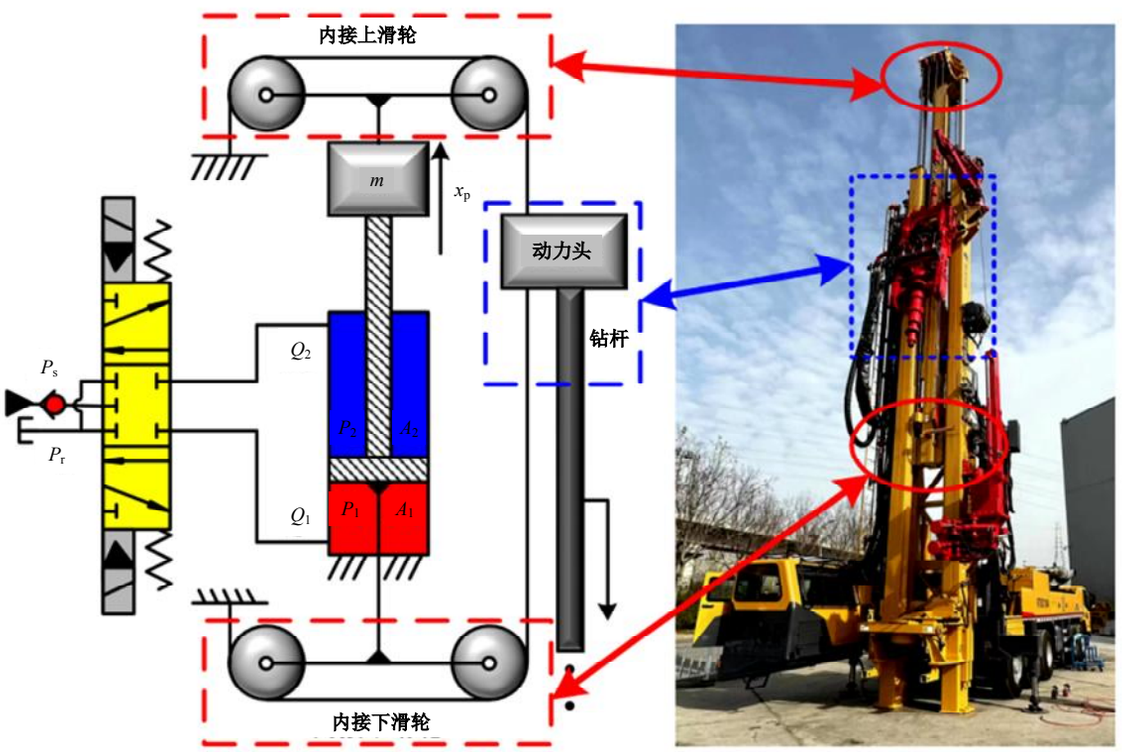

图1 车载钻机给进系统示意图

Fig. 1 Schematic of truck-mounted drilling rig feeding system

车载钻机的给进过程比较复杂,在钻进初期,钻杆总重量较小,需要对钻杆施加压力以保证钻进效率,而在钻进中后期,钻杆总重量较大,则需要对钻杆施加提升力以保证钻进安全性,再加上地质环境的不均匀性,导致钻机给进系统的载荷变化范围大,增加了给进油缸位置控制的的难度。

1.2 数学模型

根据牛顿第二定律,车载钻机给进系统单出杆液压缸动力学模型如下:

$$m\ddot{x}_p=(P_1A_1-P_2A_2)-B\dot{y}-F_L+F_d \quad (1)$$

式中:m为油缸及钻具的集成质量;x_p为液压缸活塞杆的位移,其速度和加速度可分别表示为$\dot{x}_p$和$\ddot{x}_p$;B为系统黏性阻尼系数;F_L为液压缸的外载荷力;F_d为包含建模误差和不确定参数的系统扰动。

随着密封技术的发展,液压执行器的外泄漏可忽略不计[9]。因此,不考虑外泄漏的非对称缸压力动力学方程为:

$$\begin{cases}\dot{P}_1=\dfrac{\beta_e}{V_{01}+A_1y}\left[Q_1-A_1\dot{y}-C_t(P_1-P_2)\right]\\ \dot{P}_2=\dfrac{\beta_e}{V_{02}+A_2y}\left[-Q_2-A_2\dot{y}+C_t(P_1-P_2)\right]\end{cases} \quad (2)$$

式中:P_1和P_2分别为给进油缸进油腔和回油腔的压力;β_e为有效油液体积模量;V_{01}和V_{02}分别为油缸两腔的初始体积;A_1和A_2分别为液压缸无杆腔和有杆腔的有效面积;C_t为液压缸的总内泄漏系数;Q_1和Q_2分别为进入无杆腔和有杆腔的流量。

$$\begin{cases}Q_1=k_qx_v\left[s(x_v)\sqrt{P_s-P_1}+s(-x_v)\sqrt{P_1-P_r}\right]\\ Q_2=k_qx_v\left[s(x_v)\sqrt{P_2-P_r}+s(-x_v)\sqrt{P_s-P_2}\right]\end{cases} \quad (3)$$

式中:k_q为电液控制阀的流量增益系数;P_s和P_r分别为系统的供液压力和油箱压力;x_v为控制阀的阀芯位置。

由于电液阀的动态响应特性比整个系统快得

多，所以 x_v 和控制电压 u 之间的关系可以近似表示为 $x_v=k_v \cdot u$，其中 k_v 为控制阀的电压增益。此外，自定义函数 $s(*)$ 可以表示为：

$$s(*)=\begin{cases}1, & \text{if } *\geqslant 0\\ 0, & \text{if } *<0\end{cases} \tag{4}$$

定义给进油缸系统的状态变量为 $\boldsymbol{x}=[x_1,\ x_2,\ x_3]^{\mathrm{T}}=[x_p,\ \dot{x}_p,\ A_1P_1-A_2P_2]^{\mathrm{T}}$。结合上述方程，整个系统的动力学可以描述为：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=\dfrac{1}{m}x_3-\dfrac{B}{m}x_2+F_{\mathrm{T}}\\ \dot{x}_3=g_2u-g_2x_2-g_3(P_1-P_2)\end{cases} \tag{5}$$

式中：F_{T} 为集成总扰动，且与总载荷力有关，可表示为 $F_{\mathrm{T}}=(-F_{\mathrm{L}}+F_{\mathrm{d}})/\mathrm{m}$。

式(5)的详细参数可表示为：

$$\begin{cases}R_1=\sqrt{\dfrac{P_s}{2}+\mathrm{sgn}(x_v)\left(\dfrac{P_s}{2}-P_1\right)}\\ R_2=\sqrt{\dfrac{P_s}{2}+\mathrm{sgn}(x_v)\left(P_2-\dfrac{P_s}{2}\right)}\\ g_1=\left(\dfrac{A_1R_1}{V_{01}+A_1y}+\dfrac{A_2R_2}{V_{02}+A_2y}\right)\beta_e k_t\\ g_2=\left(\dfrac{A_1^2}{V_{01}+A_1y}+\dfrac{A_2^2}{V_{02}-A_2y}\right)\beta_e\\ g_3=\left(\dfrac{A_1}{V_{01}+A_1y}+\dfrac{A_2}{V_{02}-A_2y}\right)\beta_e C_t\end{cases} \tag{6}$$

一般情况下，油缸两腔压力 P_1 和 P_2 以 P_s 和 P_r 为界，即 $0\leqslant P_r\leqslant P_1$，$P_2<P_s$，且系统的集成扰动也被假设为有界的，即 $F_{\mathrm{Tmin}}\leqslant F_{\mathrm{T}}\leqslant F_{\mathrm{Tmax}}$ 和 $\dot{F}_{\mathrm{Tmin}}\leqslant \dot{F}_{\mathrm{T}}\leqslant \dot{F}_{\mathrm{Tmax}}$。期望轨迹 x_d、速度 $\dot{x}_d$ 及加速度 $\ddot{x}_d$ 均存在且有界。

2　控制器设计

为了提高车载钻机给进油缸电液系统的位置控制精度，本节设计了基于神经网络补偿的级联控制器(NCC)。在位置控制外环，设计了基于径向基函数神经网络的扰动观测器(NNDO)对系统扰动进行实时估计和补偿，并引入了全局快速终端滑模面(GFTSMC)代替传统的滑模面，提高系统的有限时间收敛性和控制精度，同时削弱传统滑模控制器的抖振现象。在压力控制内环，利用反演法得到电液控制的实际电压输入量，压力内环为一阶系统，可避免电液系统反演控制器设计中的“导数爆炸”问题。最后，利用Lyapunov理论验证了整个闭环控制系统的稳定性。所提出的新型位置控制器结构原理图如图2所示。

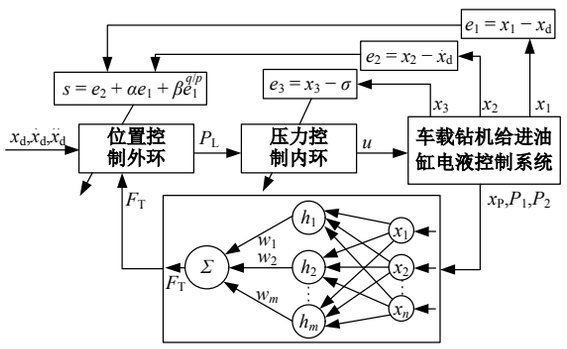

图2　级联控制器结构示意图

Fig. 2　Schematic of cascade controller structure

2.1　神经网络扰动观测器设计

径向基函数神经网络以其强大的在线学习能力被广泛应用，主要包括输入层、隐藏层和输出层。本文设计的NNDO可表示如下：

$$\begin{aligned}h_j&=\exp\left(-\frac{\left\|\lambda-c_j\right\|^2}{b_j^2}\right)\\ F_{\mathrm{T}}&=\boldsymbol{w}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{h}(\lambda)+\varepsilon\\ \hat{F}_{\mathrm{T}}&=\hat{\boldsymbol{w}}\boldsymbol{h}(\lambda)\\ \widetilde{F}_{\mathrm{T}}&=F_{\mathrm{T}}-\hat{F}_{\mathrm{T}}\widetilde{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}(\lambda)+\varepsilon\end{aligned} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{h}$ 为高斯函数计算的隐藏层输出；c、b 分别为高斯函数的中心坐标和宽度；j 为节点数；$\boldsymbol{\lambda}=[x_1,\ x_2]^{\mathrm{T}}$ 为RBF神经网络的输入；$\boldsymbol{w}^*$ 为理想权值；$\hat{\boldsymbol{w}}$ 为估计权值；ε 为神经网络的近似误差，且 $\varepsilon\leqslant\varepsilon_N$。

2.2　级联控制器设计

传统的滑模面不能收敛到零，系统输出会沿滑模面产生颤振，虽然终端滑模面可收敛到零，但与线性滑模面相比，其收敛速度较慢。因此，本文引入全局快速终端滑模面，系统状态在有限时间内快速收敛到零。

将跟踪误差定义为：

$$\begin{cases}e_1=x_1-x_{\mathrm{d}}\\ e_2=x_2-[\,x\,]_{\mathrm{d}}\end{cases} \tag{8}$$

结合式(5)(8)，可得 $\dot{e}_1=e_2$，然后将全局快速终端滑模面设计为：

$$s=e_2+\alpha e_1+\beta e_1^{q/p} \tag{9}$$

式中：α 和 β 是两个正常数；q 和 p 为正奇数；对于任意初始状态 $e_1(0)\neq 0$，收敛到平衡状态 $e_1=0$ 的时间为：

$$t_s=\frac{p}{\alpha(p-q)}\ln\frac{\alpha e_1(0)^{(p-q)/p}}{\beta}+\beta \tag{10}$$

由式(10)可知,收敛时间t_s可通过系统参数α、β、q和p调节,当系统状态沿滑模面滑动时,式(9)可改写为:

$$e_2=-\alpha e_1+\beta e_1^{q/p} \tag{11}$$

当跟踪误差e_1较大时,收敛时间主要由末端项$\beta e_1^{q/p}$决定,收敛速度较快;当e_1较小时,收敛时间主要由$-\alpha e_1$决定,系统状态精确收敛到平衡状态。

全局快速终端滑模面的时间导数为:

$$\dot{s}=\dot{e}_2+\alpha e_2+\beta e_1^{(q-p)/p}e_2q/p \tag{12}$$

定义x_3的虚拟控制为σ,即位置外环的期望输入,内环跟踪误差定义为$e_3=x_3-\sigma$,则σ表示为:

$$\sigma=Bx_2-m\hat{F}T+m\ddot{x}d-m\alpha e_2-mk_1s-m\beta e_1^{(q-p)/p}e_2q/p-\varepsilon_N\mathrm{sign}(s) \tag{13}$$

式中:k_1为一个正常数。

得到电液控制阀的实际输入量,e_3的时间导数可以进一步表示为:

$$\dot{e}_3=g_1u-g_2x_2-g_3(P_1-P_2)-\dot{\sigma} \tag{14}$$

取系统实际输入电压u为:

$$u=\frac{1}{g_1}\left(g_2x_2+g_3(P_1-P_2)+\dot{\sigma}-\frac{1}{m}s-k_2e_3\right) \tag{15}$$

2.3 稳定性分析

验证所提出控制器的稳定性,定义位置外环的Lyapunov函数V_1为:

$$V_1=\frac{1}{2}s^2+\frac{1}{2\gamma}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} \tag{16}$$

结合式(13)和式(16),函数V_1的动态方程可表示为:

$$\dot{V}_1=s\left[\frac{1}{m}x_3-\frac{B}{m}x_2+F_{\mathrm{T}}-\ddot{x}_{\mathrm{d}}+\alpha e_2+\beta e_1^{(q-p)/p}e_2q/p\right]-\frac{1}{\gamma}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\dot{\hat{\boldsymbol{w}}}=$$

$$-k_1s^2+\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\left(s\boldsymbol{h}(\boldsymbol{\lambda})-\frac{1}{\gamma}\dot{\hat{\boldsymbol{w}}}\right)+\varepsilon s-\varepsilon_N|s|-\frac{1}{m}e_3s \tag{17}$$

保持位置外环的稳定性,将NNDO的自适应律设计为:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{w}}}=\gamma s\boldsymbol{h}(\boldsymbol{\lambda}) \tag{18}$$

式中:γ为一个正常数。

NNDO通过实时调整神经网络权值,使其逼近实际扰动,保证给进油缸电液系统的位置跟踪精度,通过GFTSMC计算位置外环的期望输入。

将式(18)代入式(17),可得:

$$\dot{V}_1=-k_1s^2+\varepsilon s-\varepsilon_N|s|-\frac{1}{m}e_3s \tag{19}$$

定义Lyapunov函数$V_2=V_1+e_3^2/2$,则V_2的时间导数为:

$$\dot{V}_2=\dot{V}_1+e_3(g_1u-g_2x_2-g_3(P_1-P_2)-\dot{\sigma}) \tag{20}$$

将式(15)(17)(18)代入式(19),可得:

$$\dot{V}_2=-k_1s^2-k_2e_3^2+\varepsilon s-\varepsilon_N|s| \tag{21}$$

根据ε的定义,可得$\varepsilon\cdot s-\varepsilon_N\cdot|s|\leqslant\varepsilon\cdot|s|-\varepsilon_N\cdot|s|\leqslant0$,则进一步有$V_2\leqslant-k_1s^2-k_2e_3^2\leqslant0$。基于Lyapunov稳定性理论,整个给进油缸控制闭环系统是渐近稳定的,且收敛速度与选择的k_1和k_2有关。

3 仿真结果

为了验证本文所设计的级联控制器的性能,在MATLAB/Simulink中建立了钻机给进油缸电液系统仿真模型,期望轨迹为$x_{\mathrm{d}}=0.1\cdot\sin(0.1\pi t)\cdot(1-\exp(t^3))$ m。为了模拟实际钻进时的变载荷工况,对系统施加幅值为50 kN、频率为1 Hz的交变载荷力。此外,为了验证所设计NCC控制器的有效性,引入了PID控制器、SMC控制器和RBC控制器进行跟踪误差对比,同时,选用了3个跟踪误差指标(绝对跟踪误差的平均值、最大值和标准差)来评判控制器的控制性能。

平均绝对跟踪误差定义为:

$$A_{\mathrm{e}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|e_1(i)\right| \tag{22}$$

最大绝对跟踪误差定义为:

$$M_{\mathrm{e}}=\max_{i=1,\cdots,N}\left\{\left|e_1(i)\right|\right\} \tag{23}$$

定义绝对跟踪误差的标准差为:

$$S_{\mathrm{e}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left|e_1(i)\right|-A_{\mathrm{e}}\right]^2} \tag{24}$$

(1) PI:比例-积分控制。k_{p}的取值主要用于调节系统的响应速度,但过大的比例增益会引起系统振荡,k_{i}主要用来调节系统的跟踪误差,但过大的积分增益会加剧超调量。根据调试结果,PI控制器的增益选择为$k_{\mathrm{p}}=300$,$k_{\mathrm{i}}=900$。

(2) SMC:基于NNDO的滑模控制器。传统滑模面参数为$\alpha=0.15$,控制参数为$k_1=200$,$k_2=10$,$\varepsilon_N=20$。选取RBF神经网络结构为2-5-1,输入为$\boldsymbol{\lambda}=[x_1,\ x_2]^{\mathrm{T}}$,选取高斯函数的坐标向量为$\boldsymbol{c}$

$=[-1,-0.5,0,0.5,1;-1,-0.5,0,0.5,1]^{\mathrm{T}}$，宽度向量为 $\boldsymbol{b}=[5,5,5,5,5]^{\mathrm{T}}$，神经网络的学习增益为 $\gamma=5\,000$。

（3）RBC：基于高增益干扰观测器（HGDO）的鲁棒反演控制器。鲁棒反步控制器的控制参数 $k_1=300$，$k_2=900$，$k_3=300$，HGDO 的增益为 $\varepsilon=500$。

（4）NCC：本文提出的基于 NNDO 的级联控制器。全局快速终端滑模面参数为 $\alpha=0.1$，$\beta=0.2$，$q=3$，$p=5$，控制参数为 $k_1=200$，$k_2=10$，$\varepsilon_N=20$，NNDO 的参数与 SMC 控制器设置相同。在参数调整过程中，全局快速终端滑模面系数主要通过提高响应速度来改善控制器性能，但较大的值会引起振荡，较小的值则会降低精度。因此，α 值和 β 值需要根据系统要求进行调整。

图 3 展示了所设计控制器对期望轨迹的跟踪情况，给进油缸的实际轨迹与期望轨迹整体上重合。图 4 进一步展示了 4 种控制器的跟踪误差。从图中可以看出，PI 控制器的最大跟踪误差为 4.59 mm，平均跟踪误差为 1.26 mm。而 SMC 控制器和 RBC 控制器通过干扰观测器对系统不确定参数和未知干扰进行补偿，拥有更高的位置跟踪精度。其中，SMC 控制器的最大跟踪误差为 1.29 mm，平均跟踪误差为 0.82 mm。本文设计的 NCC 控制器与 SMC 控制器使用相同的神经网络干扰观测器和控制参数，但是引入了全局快速终端滑模面替代传统的滑模面，最大跟踪误差和平均跟踪误差分别为 0.16 mm 和 0.08 mm，与传统滑模控制器相比，精度分别提高了 87.6% 和 90.24%。因此，NCC 控制器具有更快的收敛速度和更高的精度。

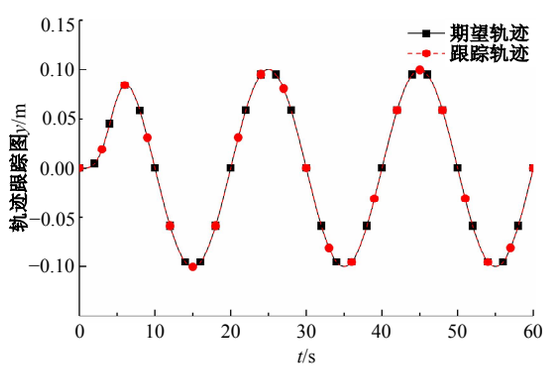

图 3　NCC 控制器轨迹跟踪图

Fig. 3　NCC controller trajectory tracking diagram

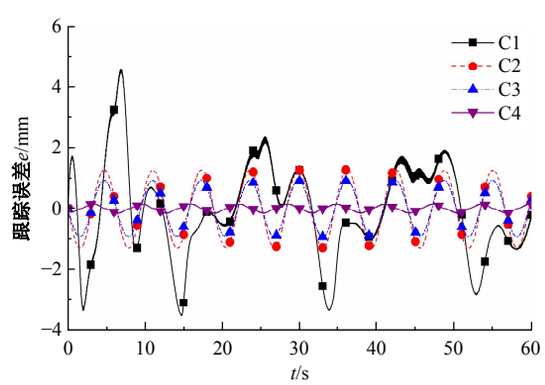

图 4　四种对比控制器跟踪误差图

Fig. 4　Tracking errors of four comparison controllers

表 1　四种控制器性能指标

Table 1　Performance indicators of four controllers

指标/mm	A_e	M_e	S_e
PI	1.26	4.59	0.93
SMC	0.82	1.29	0.40
RBC	0.59	0.92	0.29
NCC	0.08	0.16	0.05

图 5 展示了本文所设计的 NNDO 和高增益干扰观测器（HGDO）对系统扰动的估计情况，其中设定的集成载荷包含正、负方向的载荷力，以模拟钻进过程的恶劣工况。图 6 展示了两种干扰观

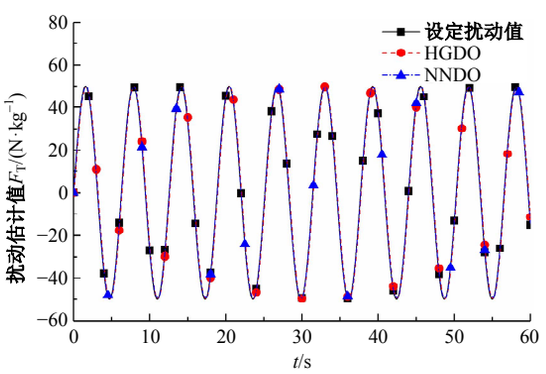

图 5　系统扰动估计图

Fig. 5　System disturbance estimation diagram

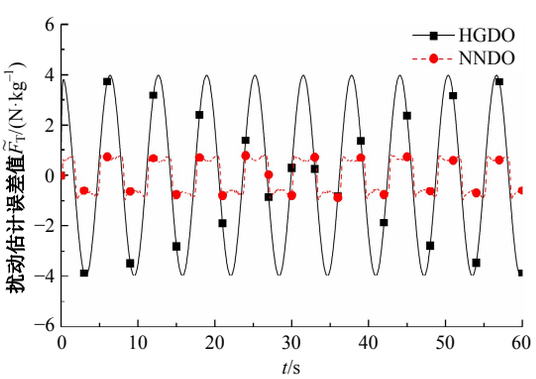

图 6　对比扰动观测器估计误差图

Fig. 6　Estimation errors with different disturbance observers

测器的估计误差。HGDO的平均估计误差为2.54 N/kg,最大估计误差为3.99 N/kg,估计误差的标准差为1.23 N/kg。而NNDO的平均估计误差为0.67 N/kg,最大估计误差为1.00 N/kg,估计误差的标准差为0.14 N/kg。与HGDO相比,NNDO的平均估计误差降低了73.62%。因此,所设计的基于神经网络的扰动观测器对未知扰动有更好的估计效果。

4 实验结果

为进一步验证所提出控制器的控制性能,搭建了重载非对称缸位置控制实验平台,如图7所示。

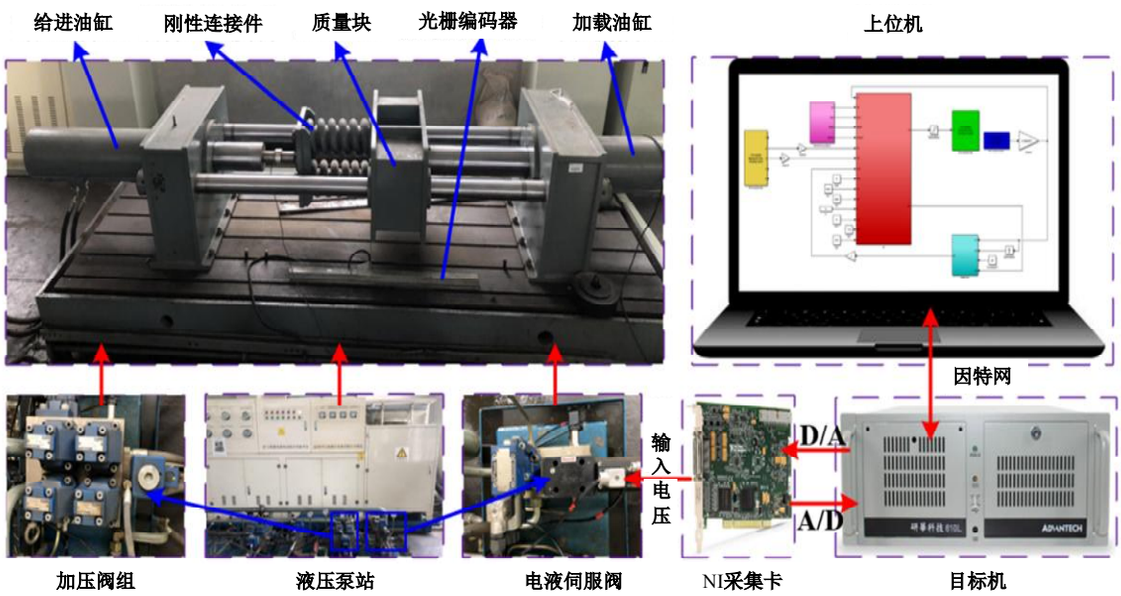

图7 重载阀控缸实验平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of heavy duty valve-controlled cylinder test platform

表2 重载非对称缸实验平台参数

Table 2 Parameters of heavy asymmetric cylinder test platform

参数	数值	参数	数值
A_1/m^2	0.031 4	m/kg	320
A_2/m^2	0.016 014	B/(N·m)	2 000
P_s/Pa	14×10^6	β_e/Pa	7×10^8
P_r/Pa	0	$C_t/(m^3\cdot(s\cdot Pa)^{-1})$	4×10^{-13}
V_{01}/m^3	0.015	$k_t/(m^3\cdot s\cdot V\cdot(Pa)^{1/2})$	8.91×10^{-8}
V_{02}/m^3	0.008	n	0.51

为了验证了所设计控制器的有效性,同样设置了4种控制器进行性能对比分析,并在两种工况下进行实验测试,所使用的控制器参数如表3所示。

试验台硬件主要包括泵站(60 L/min)、电液伺服阀(Rexroth 4WRPH10C3B100L)、比例溢流阀(Rexroth DBE10Z-1X)和非对称缸(尺寸为140 mm/ 200 mm/ 800 mm),传感器包含一个光栅编码器(Heidenhain LS628C)和两个压力传感器(Winters LVC)。另外,该试验台的控制系统是一个基于Simulink xPC Target的实时控制系统,由上位机(Dell Vostro 3460)、目标机(Advantech 610L)和数据采集单元(NI 6229)组成。重载非对称缸实验平台的具体参数如表2所示[12]。

表3 四种控制器参数

Table 3 Key parameters of four controllers

控制器	参数
PID	$k_p=5\,000$, $k_i=1\,000$
SMC	$\alpha=100$, $k_1=800$, $k_2=300$, $\varepsilon_N=2$, $\gamma=5\,000$
RBC	$k_1=800$, $k_2=300$, $k_3=40$, $\varepsilon=500$
NCC	$\alpha=6$, $\beta=1.8$, $q=3$, $p=5$, $k_1=800$, $k_2=300$, $\varepsilon_N=2$, $\gamma=5\,000$

4.1 正弦轨迹跟踪工况

工况1为正弦信号轨迹跟踪实验,期望运动轨迹为$x_d=0.05\sin(0.2\pi t)$ m,所设计控制器的轨迹跟踪图如图8所示。总体而言,控制油缸的轨迹能紧密跟踪期望轨迹,但在改变运动方向时存在较大的跟踪误差,这主要是因为实验平台控制油缸和加载油缸之间的刚性连接件存在间隙,

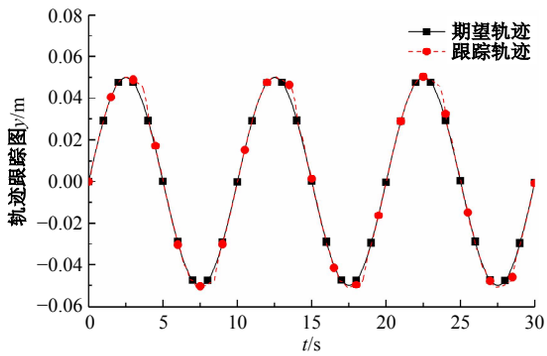

图 8　工况 1 轨迹跟踪图

Fig. 8　Trajectory tracking diagram with Condition 1

活塞杆每次换向时要先经过间隙距离才能带动光栅编码器运动，这在连续运动中是不可避免的。

图 9 展示了工况 1 下 4 种控制器的跟踪误差。从图中可以发现，虽然 PI 控制器具有最大的增益系数，但其仍然有最大的跟踪误差 12.87 mm 和最大的平均跟踪误差 4.16 mm，这说明了 PI 控制器在处理未知时变负载方面存在局限性。而 SMC 和 RBC 控制器的跟踪误差显著减小，表明滑模控制和鲁棒反演控制具有更强的鲁棒性。所设计的 NCC 控制器由于采用全局快速终端滑模面所以具有更快的响应速度，但更快的响应速度也容易引起振荡问题。基于传统滑模面的 SMC 控制器的最大跟踪误差和平均跟踪误差分别为 10.00 mm 和 1.24 mm，而基于全局快速终端滑模面的 NCC 控制器的最大跟踪误差和平均跟踪误差分别为 7.45 mm 和 1.14 mm，跟踪误差分别降低了 25.5% 和 8.06%。因此，与其他对比控制器相比，本文提出的级联控制器不仅可以简化设计流程，而且具有最佳的跟踪性能。

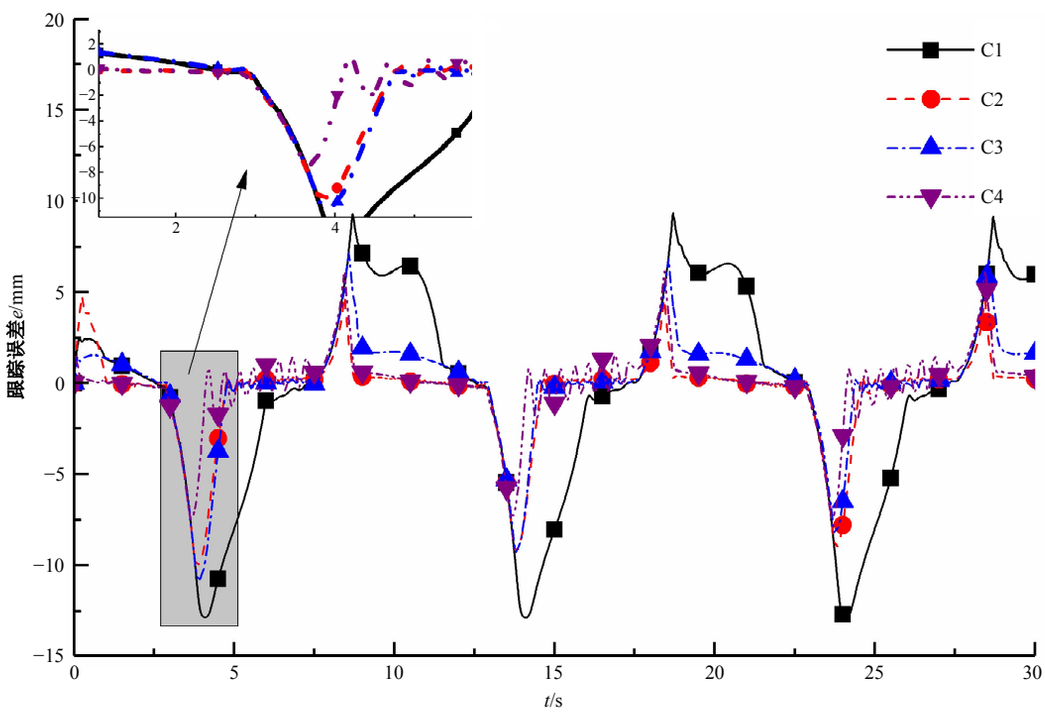

图 9　工况 1 四种对比控制器跟踪误差图

Fig. 9　Tracking errors of four comparison controllers with Condition 1

图 10 展示了本文所设计的 NNDO 和 HGDO 对系统扰动的估计情况。从图中可以看出，两种干扰观测器的总体变化趋势是一致的，HGDO 的最大估计值为 3.53 N/kg，NNDO 的最大估计值为 3.57 N/kg，且峰值点出现的位置也一样。但 HGDO 的标准差为 1.6 N/kg，而 NNDO 的标准差仅为 0.96 N/kg，相比降低了 40%。因此，所设计的基于神经网络的干扰观测器估计结果更为平滑，有利于级联控制器进行估计和补偿，提高位置跟踪性能。表 4 详细展示了 4 种控制器的跟踪误差指标。

4.2　点到点型轨迹跟踪工况

工况 2 为点到点信号轨迹跟踪实验，液压缸在 2 s 内伸出至 20 mm，所设计控制器的轨迹跟踪图如图 11 所示。同样地，由于缓冲连接器的存在，液压缸在改变运动方向的瞬间会产生较大的

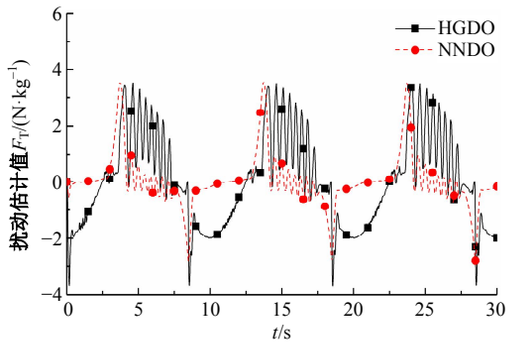

图10 工况1扰动观测器估计图。

Fig. 10 Disturbance observer estimation diagram with Condition 1

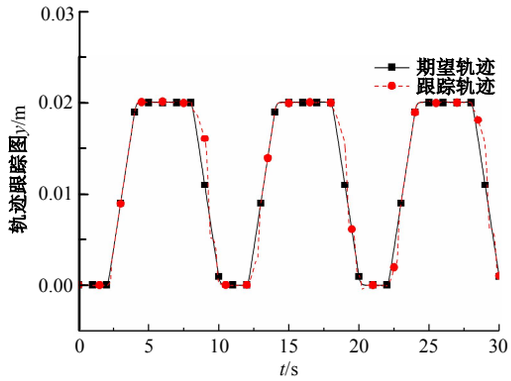

图11 工况2轨迹跟踪图

Fig. 11 Trajectory tracking diagram with Condition 2

表4 四种控制器性能指标

Table 4 Performance indicators of four controllers with Condition 1

指标/mm	A_e	M_e	S_e
PID	4.16	12.87	3.68
SMC	1.24	10	2.21
RBC	1.67	10.8	2.23
NCC	1.14	7.45	1.64

跟踪误差,但跟踪轨迹整体与期望轨迹一致。

图12展示了工况2下4种控制器的跟踪误差。从图中可以发现,在点到点的实验中4种控制器的轨迹跟踪性能相差不大,RBC控制器拥有最小的跟踪误差峰值4.86 mm,所设计的NCC控制器拥有最小的平均跟踪误差0.49 mm和最小的标准差1.02 mm,与基于传统滑模面的SMC控制器相比,最大跟踪误差和平均跟踪误差的精度分别提升了9.12%和8.47%。因此,全局快速终端滑模面较传统滑模面拥有更快的收敛速度和控制精度。

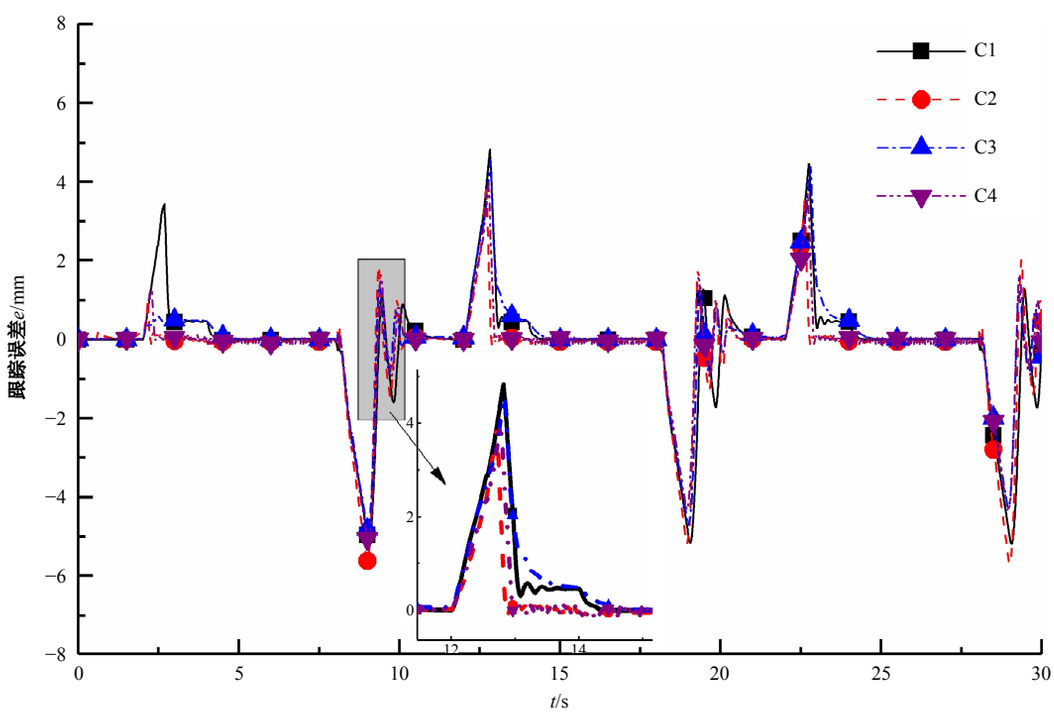

图12 工况2四种对比控制器跟踪误差图

Fig. 12 Tracking errors of four comparison controllers with Condition 2

图13展示了本文所设计的NNDO和HGDO对系统扰动的估计情况。从图13中可以看出,在点到点的实验中两种干扰观测器的总体变化趋势仍然是一致的,且HGDO和NNDO的估计值峰值点出现的位置也一致,最大估计值分别为3 N/kg和2.47 N/kg。但NNDO的标准差为0.54 N/kg,

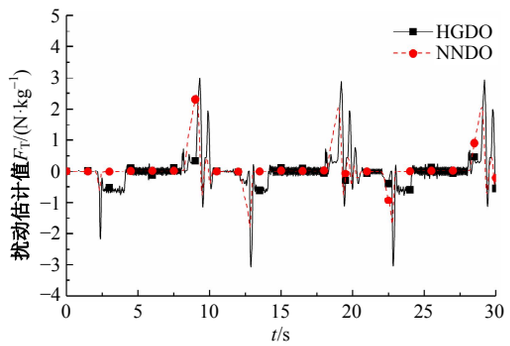

图 13　工况 2 扰动观测器估计图

Fig. 13　Disturbance observer estimation diagram with Condition 2

与 HGDO 的标准差 0.62 N/kg 相比，降低了 12.9%，所以 NNDO 的估计值更加平滑。因此，所设计的控制器不仅对正弦运动有效，而且对点到点运动也有效。表 5 详细展示了工况 2 下 4 种控制器的跟踪误差指标。

表 5　工况 2 下 4 种控制器性能指标

Table 5　Performance indicators of four controllers with Condition 2

指标/mm	A_e	M_e	S_e
PID	0.69	5.2	1.23
SMC	0.54	5.7	1.16
RBC	0.58	4.86	1.07
NCC	0.49	5.18	1.02

5　结　论

(1)为了提高车载钻机地面钻孔救援效率，针对其给进系统提出了一种基于神经网络的级联控制器以提高位置控制精度，利用 RBF 神经网络的在线学习能力来估计系统不确定参数、建模误差和未知扰动力组成的集成扰动。

(2)级联控制器包括位置外环和压力内环，其中在位置控制外环引入全局快速终端滑模面，在压力控制内环采用反演法计算控制阀的实际输入电压，并通过李亚普诺夫理论证明了系统的稳定性。

(3)对 4 种对比控制器进行仿真和实验，验证所设计控制器的有效性。仿真和实验结果表明，神经网络干扰观测器与高增益干扰观测器相比，估计精度提高了 73.62%。基于全局快速终端滑模的控制器与基于传统滑模面的控制器相比，在两种工况下的跟踪精度分别提高了 8.06% 和 8.47%。

参考文献：

[1] 田宏亮，张阳，郝世俊，等. 矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J]. 煤炭科学技术，2019，47(5)：29-33.
Tian Hong-liang，Zhang Yang，Hao Shi-jun，et al. Technology and equipment for rapid safety construction of emergencyrescue channel after mine disaster [J]. Coal Science and Technology，2019，47(5)：29-33.

[2] 常江华，赵良，鲁飞飞，等. ZMK5550TZJF50/120 型救援车载钻机钻压自适应电液系统研究[J]. 煤田地质与勘探，2022，50(11)：67-75.
Chang Jiang-hua，Zhao Liang，Lu Fei-fei，et al. Adaptive electro-hydraulic system of ZMK5550TZJF 50/120 truck-mounted drilling rig with WOB adaptive control function[J]. Coal Geology & Exploration，2022，50(11)：67-75.

[3] 梁栋才，汤华，吴振君，等. 基于多钻进参数和概率分类方法的地层识别研究[J]. 岩土力学，2022，43(4)：1123-1134.
Liang Dong-cai，Tang Hua，Wu Zhen-jun，et al. Stratum identification based on multiple drilling parameters and probability classification[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(4)：1123-1134.

[4] Gu Jin-heng，Ji Bo-jiang，Zhang Cong，et al. Modeling and evaluation of drilling behaviors to explore the effect of disturbance on the stability control for an electro-hydraulic drilling system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2024，220：111559.

[5] Guo Xin-ping，Wang Heng-sheng，Liu Hua. Parameter adaptive based neural network sliding mode control for electro-hydraulic system with application to rock drilling jumbo[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing，2024，38(7)：2554-2569.

[6] Zhang Zhen，Guo Yi-nan，Gong Dun-wei，et al. Global integral sliding-mode control with improved nonlinear extended state observer for rotary tracking of a hydraulic roofbolter[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2022，28(1)：483-494.

[7] 朱敏，卜旭辉，梁嘉琪. 基于无模型自适应迭代学习的液压锚杆钻机转速控制[J]. 电子测量与仪器学报，2024，38(6)：95-103.
Zhu Min，Bu Xu-hui，Liang Jia-qi. High order model-free adaptive iterative learning control for speed control of hydraulic anchor drill[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2024，

38(6): 95-103.

[8] 姚文龙, 亓冠华, 池荣虎, 等. 具有未知负载扰动的水井钻机电液伺服系统无模型自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(2): 231-240.
Yao Wen-long, Qi Guan-hua, Chi Rong-hu, et al. Model-free adaptive control for water well drilling rig electro-hydraulic servo with unknown load disturbance [J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(2): 231-240.

[9] 郭凡, 魏建华, 张强, 等. 基于级联控制器的液压机位移/压力复合控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2017, 51(10): 1937-1947.
Guo Fan, Wei Jian-hua, Zhang Qiang, et al. Hybrid position/pressure control of hydraulic press based on cascade controller[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(10): 1937-1947.

[10] Li Ai-min, Meng De-yuan, Lu Bo, et al. Nonlinear cascade control of single-rod pneumatic actuator based on an extended disturbance observer[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6): 1637-1648.

[11] Han Xiao-xia, Chen Zhi-xiang, Feng Yong-bao, et al. Cascade active disturbance rejection control of single-rod electrohydrostatic actuator[J]. Asian Journal of Control, 2023, 25(3): 1888-1904.

[12] Wang Yun-fei, Zhao Ji-yun, Ding Hai-gang, et al. Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(3): 1839-1859.

[13] 曹萌萌, 胡健, 周海波, 等. 基于神经网络的机电作动器滑模输出反馈控制[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 357-365.
Cao Meng-meng, Hu Jian, Zhou Hai-bo, et al. Sliding mode output feedback control of electromechanical actuator based on neural network [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 357-365.

[14] 臧万顺, 沈刚, 赵军, 等. 基于扩张滑模观测器的电液伺服系统鲁棒控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2024, 58(3): 611-621.
Zang Wan-shun, Shen Gang, Zhao Jun, et al. Extended sliding mode observer-based robust tracking control scheme for electro-hydraulic servo systems [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(3): 611-621.

[15] Na Jing, Jing Bao-rui, Huang Ying-bo, et al. Unknown system dynamics estimator for motion control of nonlinear robotic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67, 3850-3859.