



移动阅读

薛光辉,管健,柴敬轩,等. 基于神经网络 PID 综掘巷道超前支架支撑力自适应控制[J]. 煤炭学报,2019,44(11):3596-3603. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1688

XUE Guanghui, GUAN Jian, CHAI Jingxuan, et al. Adaptive control of advance bracket support force in fully mechanized roadway based on neural network PID[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3596-3603. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1688

基于神经网络 PID 综掘巷道超前支架支撑力自适应控制

薛光辉,管 健,柴敬轩,张 昊,瞿圆媛,吴 森

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:掘进扰动下,煤炭深部开采高地应力会导致深部围岩大范围塑性破坏和强烈动力失稳,且持续时间较长,存在安全隐患,严重威胁着掘进工作面煤矿工人的人身安全。近年来,国内外学者在深部围岩压力变化规律、围岩控制理论和超前支护等方面开展了许多研究,但仍存在许多亟待解决的问题。超前支架的支撑力自适应围岩压力变化可充分利用巷道围岩的自承载能力,避免巷道围岩出现破裂、碎裂等现象。介绍了一种自移式超前支架的结构,分析了该支架支撑力液压控制系统,建立了该控制系统的数学模型,研究了该系统在无控制算法、传统 PID 控制和神经网络 PID 控制等情况下的系统性能;根据旗山矿的地质条件建立了围岩-超前支架力学耦合模型,利用 FLAC^{3D} 软件仿真拟合得到了巷道围岩压力变化曲线;并以此曲线为输入,模拟研究了在传统 PID 控制和神经网络 PID 控制两种算法时超前支架支撑力对巷道围岩压力变化的自适应变化规律。研究表明,与传统 PID 控制相比,采用神经网络 PID 控制算法后,支架支撑力控制系统调节时间约为 2 s,缩短了 16 倍,超调量约为 6%,动态性能得到了改善;自适应围岩压力跟踪误差为 0.005 5,改善了 6.8 倍,证明了神经网络 PID 控制策略能够对支架支撑力进行控制且其控制效果比传统 PID 控制效果有较大优势。

关键词:深部开采;围岩控制;超前支护;自适应控制;神经网络 PID

中图分类号:TP273.2;TD35 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2019)11-3596-08

Adaptive control of advance bracket support force in fully mechanized roadway based on neural network PID

XUE Guanghui, GUAN Jian, CHAI Jingxuan, ZHANG Hao, QU Yuanyuan, WU Miao

(School of Mechanical, Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Under excavation disturbance, high crustal stress in deep coal mining will lead to large-scale plastic failure and strong dynamic instability of deep surrounding rock, which lasts for a long time and seriously threatens the personal safety of coal miners at the excavation working face. In recent years, a lot of research have been carried on the variation law of deep surrounding rock pressure, surrounding rock control theory and advance support, but there are still many problems to be solved. In order to avoid the phenomenon of breakage and fragmentation of roadway surrounding rock, the support force of advance bracket should adapt to the change of surrounding rock pressure, so as to make full use of

收稿日期:2018-12-25 修回日期:2019-05-05 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家重点基础研究计划(973)资助项目(2014CB046306);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QJ16)

作者简介:薛光辉(1977—),男,河南汝州人,副教授,博士。E-mail:xgh@cumt.edu.cn

the self-supporting capacity of roadway surrounding rock. The structure of one kind self-forward advance bracket is introduced and its hydraulic control system is analyzed, and the mathematical model of the control system is established. The performance of the control system is studied with no control algorithm, traditional PID control algorithm and neural network PID control algorithm. According to the geological conditions in Qishan mine, the mechanical coupling model of surrounding rock-advance bracket is established, and the curve of roadway surrounding rock pressure is obtained by FLAC^{3D} simulation fitting. Taking the curve as the input, the self-adapting change rules of the advance bracket support force to the roadway surrounding rock pressure are simulated when the traditional PID control algorithm and neural network PID control algorithm are used. The results show that compared with the traditional PID control algorithm, the settling time of support force control system with neural network PID control algorithm is about 2 s, which is shortened by 16 times, and the overshoot is about 6%, and the dynamic performance is improved, and the surrounding rock pressure tracking error is only 0.005 5, improved by 6.8 times. The research results show that the advance bracket control system based on the neural network PID control strategy can control the support force of the advance bracket adaptively with the pressure of the surrounding rock and its control effect is more advantageous than that with the traditional PID control strategy.

Key words: deep mining; control of surrounding rock; advance support; adaptive control; neural network PID

随着煤炭开采深度的增加,综掘工作面面临着高地应力等复杂问题。在掘进扰动作用下,巷道围岩会出现大范围塑性变形破坏并伴随大量级、大规模的强烈动力失稳等严重现象^[1-4],严重威胁着工作面煤矿工人的人身安全,其围岩控制与超前支护问题尤为重要。研究表明,在巷道掘进过程中,围岩压力不断变化且呈一定规律性,巷道围岩本身也具有一定的自承能力^[5-6],为避免巷道围岩出现破裂、碎裂等现象,超前支架的支撑力应能够自适应围岩的压力,实现综掘工作面的安全临时支护。

近几年,国内外学者在深部围岩压力变化规律、支架失稳机理与控制 and 神经网络 PID 控制方面开展了许多研究。薛光辉等^[7-9]利用 FLAC^{3D} 软件仿真分析了深部围岩压力及其对超前支架的影响,提出了一种新型综掘巷道超前支架,对支架的支护性能进行了分析,并讨论了其工作阻力的确定方法。何勇等^[10]研究了迈步式超前支护液压支架立柱进行控制的问题。王国法等^[11-13]研究了千米深井围岩控制及智能开采、煤炭智能开采关键技术、液压支架与围岩的耦合关系。杨科等^[14]研究了大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理及其控制,通过支架让压来实现对顶板压力的自适应。栾丽君等、卢进南等^[15-16]研究了综掘巷道迈步式超前支架的电液伺服位置压力复合控制策略及多缸同步控制策略。王保勤^[17]研究了临时支架液压同步系统的多缸同步控制问题。CAO L M 等^[18]针对采煤工作面液压支架推进控制系统,仿真分析了其液压阀芯位移曲线和推进执行器流量曲线。李明等^[19]使用神经网络 PID 对伺服电机进行控制,提高了系统的自适应能力和鲁棒性。

KINOSHITA 等^[20]使用神经网络 PID 对坦克系统液位进行了控制,证明了该算法的有效性。

综上,由于对巷道围岩变形机理及支架控制系统的非线性问题认识不足,支架支撑力自适应控制的研究尚处于探索阶段。神经网络具有能够逼近任意非线性系统的优点^[21],可对 PID 参数进行实时调整,以达到自适应的目的。笔者利用神经网络 PID 理论研究所设计超前支架的支撑力自适应控制问题,使其能够自动适应顶板的压力变化,以避免因支架出力过大导致巷道围岩的破裂。

1 自移式超前支架支撑力控制系统及其数学模型

1.1 自移式超前支架及支撑力控制系统

自移式超前支架^[7]总体结构如图 1 所示,由顶梁、伸缩梁、护帮板、底座、护帮千斤顶、顶梁千斤顶和立柱等组成。顶梁与伸缩梁通过液压缸连接。护帮板与护帮千斤顶通过铰接连接。立柱与伸缩梁通过球副铰接连接,与底座通过铰接连接。

超前支架立柱油缸的液压控制系统图如图 2 所示,由油箱、乳化液泵、滤油器、电液伺服阀、单向阀、安全阀、液压缸、压力传感器、控制器和伺服放大器等组成,其中,P 为立柱液压缸压力输出;F 为压力传感器输出;MOT 为电机;“+”表示该支路输入为正;“-”表示该支路输入量为负。

支架由乳化液泵站供液。支架顶梁中心安装有压力传感器,以监测巷道围岩的压力。超前支架的支撑力由安装在立柱液压缸回路中的压力传感器来获取。超前支架支撑力自适应控制过程为:乳化液经滤

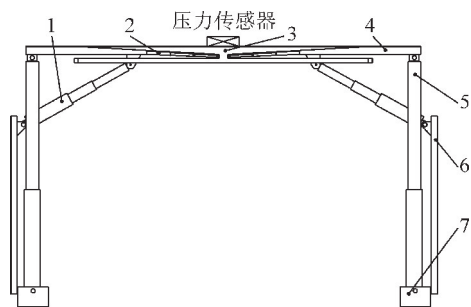


图1 超前支架总体结构示意图

Fig. 1 Overall structural schematic diagram of advance bracket

- 1—护帮千斤顶;2—顶梁千斤顶;3—顶梁;
4—伸缩梁;5—立柱;6—护帮板;7—底座

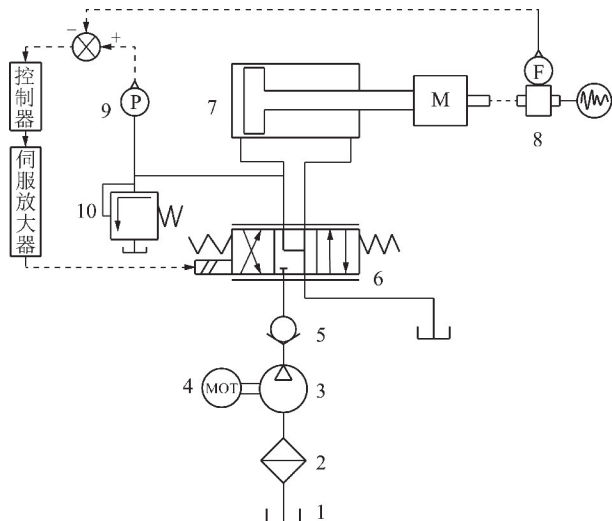


图2 超前支架液压控制系统

Fig. 2 Diagram of hydraulic control system for advance bracket

- 1—油箱;2—滤油器;3—乳化液泵;4—电机;5—单向阀;
6—电液伺服阀;7—立柱液压缸;8—顶板压力传感器;
9—油路压力传感器;10—安全阀

油器、乳化液泵、单向阀、电液伺服阀进入支架立柱液压缸下腔,立柱上升;当支架与顶板接触后,立柱液压缸内乳化液压力不断升高,以顶板压力传感器测得的顶板压力和油路压力传感器测得的支架支撑力作为控制器的输入,经控制器计算后,输出信号经伺服放大器放大后,调节电液伺服阀的开口大小及方向,使得支架输出支撑力跟踪顶板压力,实现支架支撑力自适应控制,控制系统原理框图如图3所示。

图3中, r 为顶板压力传感器测得的围岩压力; y 为支架立柱压力传感器测得的支撑力; e 为围岩压力 r 与支架输出支撑力 y 的偏差; de 为偏差 e 的变化率。以 r, y, e, de 作为神经网络PID控制器的输入,经神经网络运算后得到 K_p, K_i 和 K_d 输入PID控制器,产生的控制信号经伺服放大器放大后控制电液伺服阀,进而控制进入液压缸的流量,使得立柱输出支撑力 y 随围岩压力 r 变化,实现支架支撑力的自适应

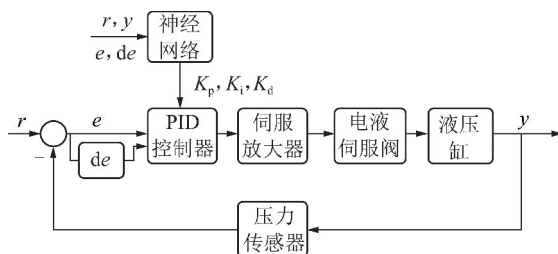


图3 超前支架控制系统原理框

Fig. 3 Block diagram of control system for advance bracket

控制,其中, K_p, K_i 和 K_d 为PID的3个参量,即比例系数、积分系数和微分系数。

1.2 控制系统数学模型

假定阀和液压缸的连接管道对称且短粗,管道动态与管中压力损失可以忽略;液压缸各工作腔内各处压力相等,油温、体积弹性模量是常数;液压缸内、外泄漏均为层流流动^[22],则有

伺服阀流量方程:

$$Q_L = k_q x_v - k_c p_L \quad (1)$$

式中, Q_L 为液压缸输入流量, m^3/s ; k_q 为伺服阀流量增益, $L/(min \cdot m)$; k_c 为阀门压力,MPa; x_v 为阀芯位移,m; p_L 为供油压力,MPa。

液压缸流量连续性方程:

$$Q_L = A_p s x_p + C_{ip} p_L + \frac{V_1}{4\beta_e} s p_L \quad (2)$$

式中, A_p 为液压缸有效工作面积, cm^2 ; s 为拉普拉斯变量; x_p 为立柱油缸活塞位移; C_{ip} 为液压缸总泄露系数, $L/(min \cdot MPa)$; V_1 为系统总压缩体积系数; β_e 为液压油弹性模量,Pa。

液压缸力平衡方程:

$$F_g = A_p p_L = M_l s^2 x_p + B_p s x_p + K_s x_p \quad (3)$$

式中, M_l 为负载质量,kg; B_p 为负载阻尼系数, $(N \cdot s)/m$; K_s 为负载弹簧刚度, N/m 。

由式(1)~(3)得到阀控液压缸的传递函数 $G_p(s)$ 为

$$G_p(s) = \frac{\frac{k_q K_s}{A_p} \left(1 + \frac{B_p}{K_s} s + \frac{M_l}{K_s} s^2 \right)}{\frac{M_l V_1}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left(\frac{M_l k_{ce}}{A_p^2} + \frac{B_p V_1}{4\beta_e A_p^2} \right) s^2 + \left(1 + \frac{B_p k_{ce}}{A_p^2} \right) s + \frac{K_s k_{ce}}{A_p^2}} \quad (4)$$

假设系统无弹性负载,上式可简化为

$$G_p(s) = \frac{F_g}{x_v} = \frac{\frac{k_q A_p}{k_{ce}} \left(1 + \frac{s^2}{\omega_m^2} \right)}{\left(\frac{s}{\omega_r} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0}{\omega_0} s + 1 \right)} \quad (5)$$

式中, F_g 为阀控液压缸所承受的负载; $k_{ce} = k_c + C_{ip}$, $L/(\text{min} \cdot \text{MPa})$; ω_m 为负载的固有频率, Hz; ω_r 为液压弹簧与负载弹簧串联耦合的刚度与阻尼系数之比, Hz; ω_0 为液压弹簧与负载弹簧并联耦合的刚度与负载质量形成的固有频率, Hz; ξ_0 为阻尼比。

电液伺服阀的传递函数为二阶振荡环节形式, 即

$$G_{SV}(s) = \frac{x_v}{\Delta I} = \frac{K_{SV}}{\frac{s^2}{\omega_{SV}^2} + \frac{2\zeta_{SV}}{\omega_{SV}}s + 1} \quad (6)$$

式中, G_{SV} 为电液伺服阀的传递函数; ΔI 为电液伺服阀输入电流变化量; K_{SV} 为伺服阀流量增益, $L/(\text{min} \cdot \text{m})$; ω_{SV} 为伺服阀固有频率, Hz; ζ_{SV} 为伺服阀阻尼比。

伺服放大器的传递函数为

$$K_p = \frac{I(s)}{U(s)} \quad (7)$$

式中, $I(s)$ 为伺服放大器输出电流, A; $U(s)$ 为伺服放大器输入电压, V。

压力传感器的传递函数为

$$K_s = \frac{U(s)}{F_g} \quad (8)$$

式中, $U(s)$ 为压力传感器输出电压, V; F_g 为液压缸输出压力, N。

综合上述各式, 可推导出超前支架支撑力控制系统开环传递函数为

$$G(s) = K_p K_s G_p(s) G_{SV}(s) = \frac{I(s)}{U(s)} \frac{U(s)}{F_g} \times \frac{\frac{k_q A_p \left(1 + \frac{s^2}{\omega_m^2}\right)}{k_{ce} \left(\frac{s}{\omega_r} + 1\right) \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0}{\omega_0}s + 1\right)}{\frac{s^2}{\omega_{SV}^2} + \frac{2\zeta_{SV}}{\omega_{SV}}s + 1} K_{SV} \quad (9)$$

2 神经网络 PID

2.1 BP 神经网络

神经网络是一种仿生式模型, 在一定程度上受到了人脑神经网络的启发^[23]。神经网络分为输入层、隐含层和输出层 3 个部分组成。图 4 为 3 层 BP 网络的结构图。信号由输入层进入神经网络, 由左向右依次传播, 直至输出层, 网络的层间是全连接。

输入层的输入为

$$O_i^{(1)} = x(i) \quad (i = 1, 2, \dots, M)$$

式中, $O_i^{(1)}$ 为神经网络输入层输入; M 为输入层网络节点个数, 根据被控系统的复杂程度取值。

隐含层输入、输出为

$$\text{net}_j^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^M v_{ji}^{(2)} O_i^{(1)}(k)$$

$$O_j^{(2)}(k) = f(\text{net}_j^{(2)}(k)) \quad (j = 1, 2, \dots, N)$$

式中, $\text{net}_j^{(2)}(k)$, $O_j^{(2)}(k)$ 分别为神经网络隐含层输入、输出; $v_{ji}^{(2)}$ 为隐含层权系数; N 为隐含层网络节点数; $f(x)$ 为隐含层激活函数。

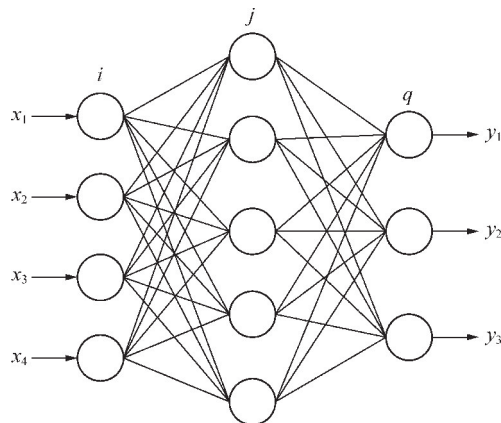


图 4 BP 神经网络结构

Fig. 4 Structure of BP neural network

输出层的输入、输出为

$$\text{net}_q^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^N v_{jq}^{(3)} O_j^{(2)}(k)$$

$$O_q^{(3)}(k) = g(\text{net}_q^{(3)}(k)) \quad (q = 1, 2, 3)$$

$$O_1^{(3)}(k) = K_p$$

$$O_2^{(3)}(k) = K_i$$

$$O_3^{(3)}(k) = K_d$$

式中, $\text{net}_q^{(3)}(k)$, $O_q^{(3)}(k)$ 分别为神经网络输出层的输入、输出; $v_{jq}^{(3)}$ 为输出层权系数; $g(x)$ 为输出层激活函数; k 为计算时刻。

取性能指标:

$$J = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2$$

依最速下降法修正网络的权系数, 并附加一使搜索快速收敛到全局极小的惯性项, 则

$$\Delta v_{jq}^{(3)}(k) = -\lambda \frac{\partial J}{\partial v_{jq}^{(3)}} + \eta \Delta v_{jq}^{(3)}(k-1)$$

式中, λ 为学习速率; η 为惯性系数。

$$\frac{\partial J}{\partial v_{jq}^{(3)}} = \frac{\partial J}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial O_q^{(3)}(k)} \times$$

$$\frac{\partial O_q^{(3)}(k)}{\partial \text{net}_q^{(3)}(k)} \frac{\partial \text{net}_q^{(3)}(k)}{\partial v_{jq}^{(3)}}$$

由于 $\partial y(k)/\partial u(k)$ 未知, 所以近似用符号函数 $\text{sgn}(\partial y(k)/\partial u(k))$ 代替, 由此计算不确定的影响可以通过调整学习速率 λ 来补偿。

根据经典增量式数字 PID 的控制算法:

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

式中, J 为性能指标函数; $r(k)$ 为 k 时刻顶板压力; $y(k)$ 为 k 时刻液压支架(立柱油缸)输出压力; $u(k)$ 为 k 时刻支架立柱油缸输入; $e(k)$ 为 k 时刻顶板压力 $r(k)$ 与液压支架输出压力 $y(k)$ 的差。

可得:

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} = e(k) - e(k-1)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_2^{(3)}(k)} = e(k)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_3^{(3)}(k)} = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

因此,可得神经网络输出层权系数计算公式为

$$\Delta v_{qj}^{(3)}(k) = \lambda \delta_q^{(3)} O_j^{(2)}(k) + \eta \Delta v_{qj}^{(3)}(k-1) \quad (10)$$

其中,

$$\delta_q^{(3)} = e(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right) \frac{\partial u(k)}{\partial O_q^{(3)}(k)} g'(\operatorname{net}_q^{(3)}(k))$$

$$q = 1, 2, 3$$

$$g'(x) = g(x)(1 - g(x))$$

从而,计算隐含层权系数如下:

$$\Delta v_{ji}^{(2)}(k) = \lambda \delta_j^{(2)} O_i^{(1)}(k) + \eta \Delta v_{ji}^{(2)}(k-1) \quad (11)$$

其中, $\delta_j^{(2)} = f'(\operatorname{net}_j^{(2)}(k)) \sum_{q=1}^3 \delta_q^{(3)} \Delta v_{qj}^{(3)}(k)$; $f'(x) = [1 - f^2(x)]/2$; $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, N$ 。

2.2 基于 BP 网络的 PID 控制器

该控制器控制算法如下:

(1) 确定 BP 网络的结构,即确定输入层节点数 M 和隐含层节点数 N ,并给出各层加权系数的初值 $v_{ji}^{(2)}(0)$ 和 $v_{qj}^{(3)}(0)$,初始化学习速率 λ 和惯性系数 η ,学习速率和惯性系数的选取一般根据仿真效果确定,令 $k=1$ 。

(2) 给定 $r(k)$, $y(k)$, 计算此时此刻误差 $e(k) = r(k) - y(k)$ 及误差的微分 $de(k) = [e(k) - e(k-1)]/T$, 其中 T 是每一次循环经历的时间。

(3) 将 $r(k)$, $y(k)$, $e(k)$ 和 $de(k)$ 作为输入,代入神经网络模型中,计算神经网络各层神经元的输入、输出,输出层的输出即为 PID 控制器的 3 个可调参数 K_p, K_i, K_d 。

(4) 计算 PID 控制器的输出 $u(k)$ 。

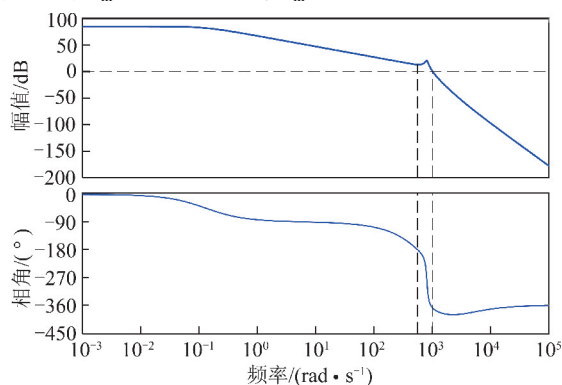
(5) 根据式(10)和式(11)调整加权系数 $v_{ji}^{(2)}(k)$ 和 $v_{qj}^{(3)}(k)$,以实现 PID 控制参数的自适应调整。

(6) 令 $k=k+1$,返回到第(2)步。

3 超前支架支撑力控制系统性能分析

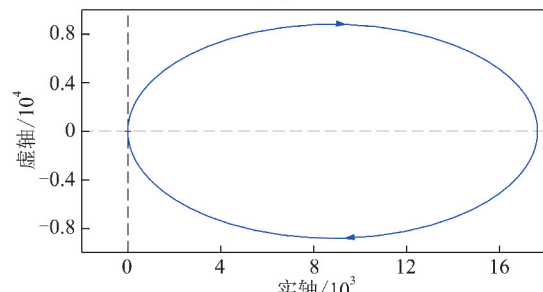
3.1 控制系统性能

根据支架下端立柱内径 130 mm, 上端立柱内径 80 mm, 计算得到 $k_q = 27\ 000\ \text{L}/(\text{min} \cdot \text{m})$, $k_{ce} = 0.06\ \text{L}/(\text{min} \cdot \text{MPa})$, $A_p = 84.425\ \text{cm}^2$, $\omega_m = 59\ \text{Hz}$, $\omega_r = 0.13\ \text{rad/s}$, $\omega_0 = 842.5\ \text{Hz}$, $\xi_0 = 0.15$, $K_{SV} = 0.056\ \text{L}/(\text{min} \cdot \text{m})$, $\omega_{SV} = 110\ \text{Hz}$, $\zeta_{SV} = 0.7$, 取伺服放大器增益 $K_p = 0.007\ \text{A/V}$, 压力传感器增益 $K_S = 100\ \text{V/N}$, 代入式(9), 利用 Matlab 仿真得到超前支架支撑力控制系统的 Bode 图和 Nyquist 图, 如图 5 所示, 其中, G_m 为幅值裕度; P_m 为相位裕度。



$$G_m = -13.1\ \text{dB}\ (\text{at}\ 557\ \text{rad/s}),\ P_m = 170^\circ\ (\text{at}\ 1010\ \text{rad/s})$$

(a) Bode图



(b) Nyquist图

图5 超前支架支撑力控制系统性能曲线

Fig. 5 Performance curve of advance bracket support force control system

由图 5 可知,系统具有负相角裕度和负幅值裕度,需要加入校正环节使系统稳定。

3.2 PID 控制

在超前支架支撑力控制系统中,引入 PID 控制后,系统的单位阶跃响应如图 6 中蓝色曲线所示。由图 6 可知,系统稳定,但调节时间过长。

3.3 神经网络 PID 控制

为改善系统的动态性能,采用神经网络来整定 PID 控制参数。采用 4-5-3 的神经网络结构模型,网络输入层节点数为 4,分别对应 $r(k)$, $y(k)$, $e(k)$ 和 $de(k)$,隐含层节点数为 5,输出层节点数为 3,分

别为对应的 PID 控制参数,隐含层激活函数采用双曲正切函数,输出层激活函数采用 Sigmoid 函数,根据仿真效果选取学习速率为 100,惯性系数为 0.05,仿真得到的系统单位阶跃响应如图 6 红色曲线所示。

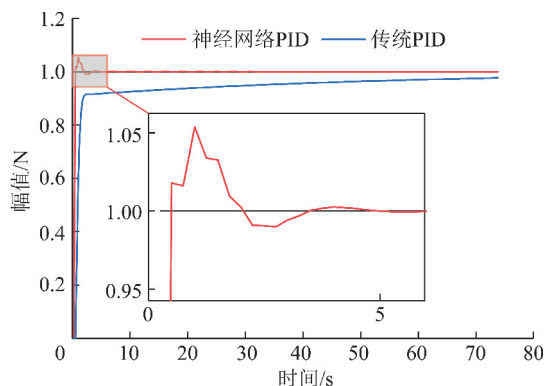


图 6 引入控制算法后支架支撑力控制系统单位阶跃响应

Fig. 6 Unit step response curves of advance bracket support force control system with algorithm

对比可知,引入神经网络 PID 后,系统的动态性能得到了很大改善,调节时间由约 32 s 缩短为约 2 s,缩短了约 16 倍,出现了约 6% 超调。

4 仿真试验

4.1 围岩压力曲线

根据实测的旗山矿的地质条件,见表 1,在 FLAC^{3D} 中建立了围岩-超前支架力学耦合模型^[7],仿真计算得到了围岩顶板的压力随时间的变化规律,如图 7 所示。由图 7 可知,围岩顶板压力呈周期性波动,且波动较大,若支架支撑力不能跟随顶板压力变化而做出调整,则可能导致顶板被破坏,且对支架寿命也有影响。

表 1 旗山矿地质条件及其力学参数^[3]

Table 1 Geological conditions and mechanical parameters in Qishan coal mine^[3]

岩层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
砂质泥岩	2 000	5	3.0	2.00	33
泥岩	2 550	5	2.3	1.20	28
3 煤	1 650	3	2.0	0.08	18
1 煤	1 650	4	2.5	1.00	24
砂岩	2 650	6	3.6	3.00	35

4.2 自适应仿真试验

以围岩顶板压力曲线作为输入,仿真分析了超前支架支撑力自适应控制系统,结果如图 8 所示。由图 8 可知,与传统 PID 控制相比,采用神经网络 PID 控

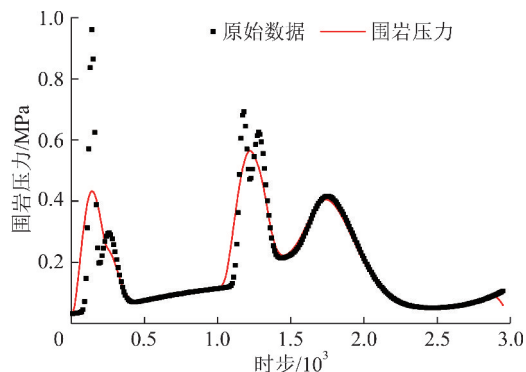


图 7 仿真得到的旗山矿围岩压力变化曲线

Fig. 7 Simulated surrounding rock pressure curves of Qishan coal mine

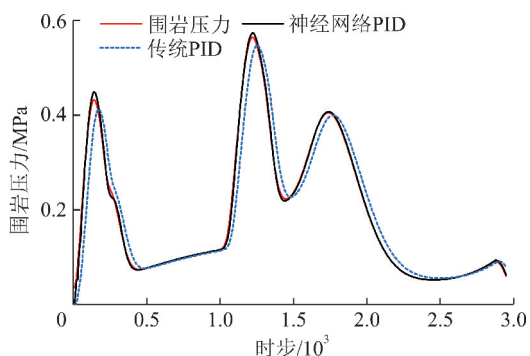


图 8 超前支架支撑力自适应控制系统仿真实验结果

Fig. 8 Simulation experiment results of adaptive control system for support force of advance support

制后,支架支撑力控制系统对围岩顶板压力的跟踪性能好。

图 9 为基于 2 种控制算法的围岩压力自适应跟踪误差曲线。由图 9 可知,采用神经网络 PID 控制策略的跟踪误差比传统 PID 的误差小,跟踪效果具有明显优势。采用神经网络 PID 控制策略时,支架支撑力自适应控制系统跟随围岩压力曲线的误差为 0.005 5,而传统 PID 控制的误差为 0.037 4,改善了约 6.8 倍。

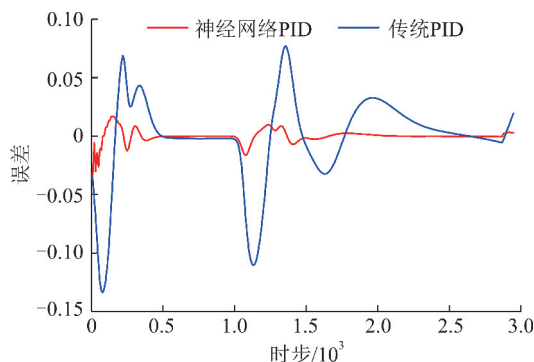


图 9 基于 2 种控制算法的围岩压力自适应跟踪误差曲线

Fig. 9 Adaptive tracking error curves of surrounding rock pressure with two control algorithms

图 10 为采用神经网络 PID 控制策略时,超前支架支撑力自适应控制系统归一化后的 PID 参数变化曲线。由图 10 可知,随着巷道围岩压力变化,神经网络不断调整 PID 参数,使得支架支撑力快速跟随围岩压力变化。

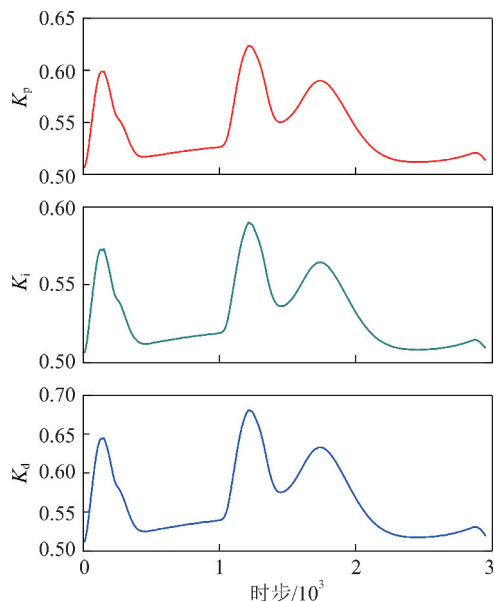


图 10 超前支架支撑力自适应控制系统归一化后 PID 参数变化

Fig. 10 Normalized PID parameters variation of the support force adaptive control system of the advance bracket

由此可知,神经网络 PID 控制时跟踪效果优势明显和较小的跟踪误差得益于在控制过程中神经网络 PID 控制策略能实时调节 PID 参数。当误差较大或较小时,神经网络能够自适应调节 PID 参数至合适的值,收敛速度更快,从而使支架支撑力跟踪围岩压力效果更好,跟踪误差更小。

5 结 论

(1) 提出了一种新型自移式综掘巷道超前支架,分析了自移式超前支架的结构,提出了支架支撑力自适应控制液压系统,阐述了其工作原理和过程,建立了该控制系统的数学模型。

(2) 改变了传统液压支架工作原理,运用神经网络 PID 控制策略对超前支架支撑力进行自适应控制,分析了系统的性能,结果表明引入神经网络 PID 控制算法后,支架支撑力控制系统调节时间比传统 PID 控制策略缩短了约 16 倍,动态性能得到了改善。

(3) 仿真计算得到了旗山矿围岩压力变化曲线,分析了支架支撑力自适应控制系统对围岩压力曲线的自适应情况,结果表明采用神经网络整定 PID 参数后,支架支撑力自适应控制系统跟随围岩压力曲线

的误差为 0.005 5,传统 PID 控制的误差为 0.037 4,改善了约 6.8 倍。

参考文献 (References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,2015,40(1):1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):1-10.
- [2] ZHANG D S, ZGANG W, WANG X F. Technical research on fully-mechanized fast drirage for deep large sections of coal-rock roadway in high stress [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 94-96:1936-1940.
- [3] 张国锋,曾开华,张春,等. 旗山矿倾斜夹层巷道破坏机理及支护设计研究[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):22-27.
ZHANG Guofeng, ZENG Kaihua, ZHANG Chun, et al. Failure mechanism and support design of interclated roadway surrounding inclined coal seam in Qishan coal mine [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1):22-27.
- [4] KANG Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: A review [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3):261-277.
- [5] 袁亮,薛俊华,刘泉声,等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报,2011,36(4):535-543.
YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4):535-543.
- [6] 黄庆享,刘玉卫. 巷道围岩支护的极限自稳平衡拱理论[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(3):354-358.
HUANG Qingxiang, LIU Yuwei. Ultimate self-stable arch theory in roadway support [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(3):354-358.
- [7] XUE Guanghui, CHENG Jijie, GUAN Jian, et al. The method for determining working resistance of advance support bracket in deep fully-mechanized roadway based on FLAC3D [J]. Advances in mechanical Engineer, 2018, 10(6):1-10.
- [8] XUE Guanghui, CHENG Jijie, GUAN Jian, et al. Surrounding rock pressure of deep roadway and influences on advance support [A]. 3rd Annual International Conference on Computer Science and Mechanical Automation [C]. Wuhan: 2017:368-374.
- [9] 薛光辉,管健,程继杰,等. 深部综掘巷道超前支架设计与支护性能分析[J]. 煤炭科学技术,2018,46(12):15-20.
XUE Guanghui, GUAN Jian, CHENG Jijie, et al. Design of advance support for deep fully-mechanized heading roadway and its support performance analysis [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12):15-20.
- [10] 何勇,郭一楠,巩敦卫. 液压支护平台的异步自抗扰平衡控制 [J]. 控制理论与应用,2019,36(1):151-163
HE Yong, GUO Yanan, GONG Dunwei. Asynchronous active disturbance rejection balance control for hydraulic support platforms [J]. Control Theory and Applications, 2019, 36(1):151-163.
- [11] 康红普,王国法,姜鹏飞,等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开

- 采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.
- KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [12] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 903-913.
- WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. Coal safe and efficient mining theory, technology and equipment innovation practice [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 903-913.
- [13] 王国法, 庞义辉, 李明忠, 等. 超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 518-526.
- WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, et al. Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 518-526.
- [14] 杨科, 池小楼, 刘帅. 大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1821-1828.
- YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1821-1828.
- [15] 栾丽君, 赵慧萌, 谢苗, 等. 超前支架速度、压力稳定切换控制策略研究[J]. 机械强度, 2017, 39(4): 747-753.
- LUAN Lijun, ZHAO Huimeng, XIE Miao, et al. Research on speed and pressure control strategy of stable switch about forepoling equipment[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(4): 747-753.
- [16] 卢进南, 谢苗, 毛君, 等. 迈步式超前支护装置降架过程控制方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(7): 745-749.
- LU Jinnan, XIE Miao, MAO Jun, et al. Control method for frame down process of stepping-type advanced supporting equipment[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(7): 745-749.
- [17] 王保勤. 巷道临时支护支架的液压同步系统设计与试验研究[J]. 矿山机械, 2017, 45(6): 14-18.
- WANG Baoqin. Design and test study of hydraulic synchronous system for roadway temporary support bracket[J]. Mining & Processing Equipment, 2017, 45(6): 14-18.
- [18] CAO L M, SUN S J, ZHANG Y Z, et al. The research on characteristics of hydraulic support advancing control system in coal mining face[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(4): 1-14.
- [19] 李明, 封航, 张延顺. 基于 UMAC 的 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(10): 2063-2070.
- LI Ming, FENG Hang, ZHANG Yanshun. RBF neural network tuning PID control based on UMAC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(10): 2063-2070.
- [20] KINOSHITA Kento, WAKITANI Shin, OHNO Shuichi. Design of neural network PID controller based on E-FRIT[J]. IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems, 2018, 205(2): 33-42.
- [21] 乔俊飞, 张力, 李文静. 基于尖峰自组织模糊神经网络的需水量预测[J]. 控制与决策, 2017, 33(2): 1-7.
- QIAO Junfei, ZHANG Li, LI Wenjing. Prediction of water demand based on spiking self-organizing fuzzy neural network[J]. Control and Decision, 2017, 33(2): 1-7.
- [22] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 134-139.
- [23] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 312-330.