

文章编号: 1671-251X(2024)12-0076-09

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2024070064](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2024070064)

基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制研究

马长青¹, 李峰¹, 黄昱博², 毛俊杰¹, 李旭阳¹, 魏祥宇¹, 马肖杨¹

(1. 山东科技大学 智能装备学院, 山东 泰安 271019;

2. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对巷道掘进过程中自移式临时支架与顶板适应性差的问题, 提出了一种基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制方法。分析了自移式临时支架的工作原理, 并针对自移式临时支架必须具备适应顶板压力变化的能力问题, 在支撑液压缸控制回路中增加了压力调整回路, 建立了自移式临时支架支撑力控制系统。为了使自移式临时支架的支撑力(即支撑液压缸的输出力)能够快速稳定地跟踪预期值, 建立了模糊 PID 自适应控制系统的模型, 对 PID 参数进行在线自调整, 实现自移式临时支架的自适应控制, 增强对顶板不平整、存在倾角等特殊工况的适应性。在 Matlab/Simulink 中建立传统 PID 控制与模糊 PID 自适应控制系统模型, 仿真结果表明: 基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制系统对围岩顶板压力的跟踪效果较传统 PID 控制更好, 临时支架自适应控制系统跟随围岩压力的误差为 0.0043, 较传统 PID 控制降低了 86.11%; 基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制系统在 0.12 s 时接近平稳, 而传统 PID 控制在 8.685 s 时才接近平稳, 说明模糊 PID 自适应控制响应速度比传统 PID 控制有较为明显的优势。在 AMESim 中建立支撑液压缸位移控制系统模型, 并与 Matlab/Simulink 进行联合仿真, 在调平过程中, 选取相邻支撑液压缸间的数据进行研究分析, 结果表明: 相邻支撑液压缸间的同步误差基本控制在 $\pm 5 \times 10^{-15}$ m 以内, 精度较传统 PID 控制方法有较大提高, 且曲线波动均匀平缓, 幅值波动范围较小。

关键词: 自移式临时支架; 支撑液压缸; 支撑力控制; 模糊 PID 自适应控制; 临时支架立柱; 相邻支撑液压缸同步控制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

Research on adaptive control of self-moving temporary support based on fuzzy PID

MA Changqing¹, LI Feng¹, HUANG Yubo², MAO Junjie¹, LI Xuyang¹, WEI Xiangyu¹, MA Xiaoyang¹

(1. Intelligent Equipment College, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;

2. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To address the issue of poor adaptability of self-moving temporary supports and roofs during roadway excavation, an adaptive control method of self-moving temporary support based on fuzzy PID was proposed. The working principle of self-moving temporary support was analyzed. A pressure adjustment circuit was added to the control circuit of the support hydraulic cylinder to tackle the problem of adapting to changes in roof pressure, and a self-moving temporary support force control system was established. To enable the self-moving temporary support force (i.e., the output force of the support hydraulic cylinder) to quickly and stably track the expected value, a fuzzy PID adaptive control system model was established to enable online adjustment of PID parameters. This achieved adaptive control of self-moving temporary support, enhancing its adaptability to

收稿日期: 2024-07-18; 修回日期: 2024-12-16; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104092); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE120); 泰安市科技创新发展项目(2021GX054)。

作者简介: 马长青(1980—), 山东济宁人, 教授, 博士后, 研究方向为矿山智能监测技术与装备, 矿山压力与围岩控制, E-mail: mcq091016@126.com。通信作者: 黄昱博(2004—), 男, 山东泰安人, 研究方向为采矿工程、矿山装备, E-mail: 2010017607@qq.com。

引用格式: 马长青, 李峰, 黄昱博, 等. 基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 76-84.

MA Changqing, LI Feng, HUANG Yubo, et al. Research on adaptive control of self-moving temporary support based on fuzzy PID[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 76-84.



扫码移动阅读

special working conditions such as roof unevenness and inclination. Simulation models of traditional PID control and fuzzy PID adaptive control systems were built in Matlab/Simulink. The simulation results showed that the fuzzy PID-based adaptive control system demonstrated better tracking performance for the surrounding rock roof pressure compared to traditional PID control. The error of the temporary support adaptive control system following the surrounding rock pressure is 0.004 3, which is 86.11% lower than that of the traditional PID control. The adaptive control system of self-moving temporary support based on fuzzy PID stabilized at 0.12 s, whereas traditional PID control stabilized at 8.685 s, indicating a significant advantage in response speed for the fuzzy PID adaptive control. A displacement control system model of the support hydraulic cylinder was established in AMESim and jointly simulated with Matlab/Simulink. During leveling, data from adjacent support hydraulic cylinders were selected for research and analysis. Results indicated that the synchronization error between adjacent hydraulic cylinders was generally controlled within $\pm 5 \times 10^{-15}$ m, showing significant precise improvement over traditional PID control method. The curves exhibited uniform and gentle fluctuations with smaller amplitude fluctuation range.

Key words: self-moving temporary support; support hydraulic cylinder; support force control; fuzzy PID adaptive control; temporary support column; adjacent hydraulic cylinder synchronization control

0 引言

目前采煤工作面与掘进工作面机械化与智能化发展不同步,造成了我国采掘失调的局面,因此亟须发展快速掘进设备^[1-3]。在煤层地质条件复杂多变的情况下,自移式临时支架进行支护动作时,由于顶板周期来压,顶板冒落现象时有发生,极易出现不合理位姿,不能对综掘工作面顶板进行有效支护,如不能对支架进行及时有效调控,将会对综掘工作面的生产作业产生严重的安全隐患^[4-7]。为提高掘进效率,保障开采安全,针对目前井下临时支护设备应用存在的对顶底板适应性不足、掘支无法并行等问题^[8-9],2019年国家煤矿矿山安全监察局发布的《煤矿机器人重点研发目录》公告强调,为了更好地实现煤矿安全,开发的智能化临时支护机器人必须具备多项功能,如对煤矿巷道围岩状况的智能感知、自主移动定位、支撑力的自适应控制、支护姿态的自适应调节、多架协作及远程干预,以实现煤矿巷道安全、有序的临时支护,从而大幅提升煤矿安全生产效率和安全保障能力^[10]。

许多学者对支架的自适应控制方法进行了大量研究。史文萍^[11]首次将模糊 PID 算法应用到液压支架的控制中,使其具有较好的稳定性,这为设计液压支架的控制系统开辟了一种新的途径,但液压支架在实际应用中仍面临一些挑战,需要进一步优化控制算法,改进参数调节方法,加强系统建模与验证工作。马长青等^[12]针对现有临时支护设备造成巷道顶板破坏和采掘失调问题,提出了一种履带式自移式临时支护结构,设计了液压系统,并通过 AMESim 进行建模与仿真,验证了液压系统工作的可靠性,并

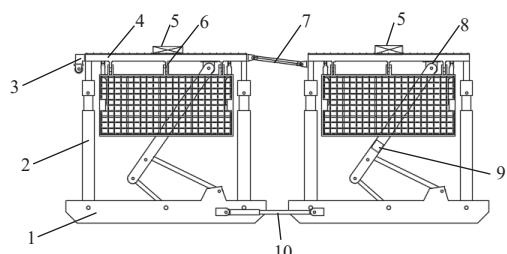
提出模糊自整定 PID 控制方法,但只考虑了顶板支护,未考虑支护巷道两帮片帮工况。杨科等^[13]研究了大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理及其控制,当支柱受顶板压力超过额定工作阻力时,在安全阀的作用下支柱下缩,使其压力均匀分布到工作面各支柱,来实现对顶板压力的自适应,但未涉及液压支架失稳控制措施经济性和实际可操作性分析,若在实际应用中实施成本过高或操作复杂,即使理论上控制方法可行,也难以被广泛采用。徐亚军等^[14]设计了一种基于模拟退火粒子群优化比例导数算法的支撑力控制器,建立了临时支架液压缸压力系统数学模型,并进行稳定性分析和模型验证,但随着超前支架的过度使用,可能增加操作复杂度,且过度依赖自适应调节可能导致系统出现可靠性低等问题。王保勤^[15]研究了临时支架液压同步系统的多缸同步控制问题,建立了推移液压缸同步控制试验系统,实现了立柱液压缸和推移液缸的同步控制,在不同偏载下系统具有较高的同步精度,但在特殊工作条件下的响应速度与同步精度不高,可能导致系统在实际应用中难以满足巷道支护的要求。任怀伟等^[16]基于液压支架自适应控制器提出了一种液压支架顶梁位姿调控系统,通过控制立柱和平衡千斤顶长度,保证支护状态下液压支架顶梁高度和姿态角稳定,但只引入了简单的 PID 控制算法,无法满足现阶段顶梁位姿调控的精度要求。薛光辉等^[17]通过基于 BP 神经网络的 PID 算法对液压支架初撑力进行调控,使液压支架快速而准确地达到预定的初撑力,但仅将神经网络用于调整当前状态的 PID 参数,未能完全根据外部扰动来实时调整 PID 参数,以适应最新状态。毛君等^[18]建立了支架支撑力调控系统数学模

型,通过模糊 PID 算法对系统进行调控,使支架支撑力有效跟随矿压变化,但未涉及超前支护液压缸的同步控制,不适用于当前井下复杂环境的调平需要。何勇等^[19]借鉴平台传统四缸同步控制方法,提出逐高双向异步控制方法,保证每一立柱油缸的位移在复杂工况下精确达到期望值,从而保持液压支护平台的平衡性,但忽略了长期运行的可靠性和易维护性,影响系统在长期实际工程中的应用。胡相捧等^[20]利用基于 BP 神经网络的 PID 算法对液压支架的初撑力进行调节,从而使液压支架能够迅速且精确地达到设定的初撑力值,但控制器的实时性和响应速度未充分探讨,PID 控制不能满足现阶段的精度要求。

针对上述问题,为了解决巷道掘进过程中自移式临时支架与顶板适应性不足的问题,本文提出了一种基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制方法。通过对临时支架立柱的伸缩调整,控制支架的姿态和支撑力;通过仿真对传统 PID 控制与模糊 PID 自适应控制方法进行对比,以验证引入模糊 PID 自适应控制算法的有效性。

1 自移式临时支架结构设计

自移式临时支架主要包括底座、液压立柱、顶梁、侧护帮、防倒机构、四连杆机构、推移机构等,如图 1 所示。顶梁与伸缩梁由油缸连接,护帮板与护帮千斤顶之间采用铰链连接。液压立柱采用球形副铰链连接到支架顶梁的伸缩杆上,并采用铰链连接到底座上。底座上设有 4 个可伸缩的液压立柱,且每个液压立柱具备自锁功能。顶梁固定在立柱顶端,在顶梁上设置若干小型底座和压力传感器。此外,顶梁上还配置有铺网装置,用于环状铺设液压立柱。两侧分别设置侧护帮,确保侧护帮与巷道两侧有效接触,从而防止巷道掘进或打锚杆时矸石落入工作区域,保障施工人员的安全并保持巷道断面的完整性。同时,四连杆机构配备角度传感器,用于监测支架顶梁的角度变化。



1—底座;2—液压立柱;3—铺网装置;4—顶梁;5—压力传感器;6—侧护帮;7—防倒机构;8—四连杆机构;9—角度传感器;10—推移机构。

图 1 自移式临时支架总体结构

Fig. 1 Overall structure of self-moving temporary support

在自移式临时支架的顶梁设计多个层次的环状液压立柱(多个层次液压立柱是针对巷道顶板不平整而设计的结构),其主要展现在顶梁中心有一个小型液压立柱(图 2),周围有 3 圈小型液压立柱(图 3),每个小型液压立柱都是独立的,根据巷道顶板的凹凸情况,顶梁的液压立柱有不同的工况,从而对应不同的工作状态。当支护设备处于工作状态时,小型液压立柱错落不一,从而可适应巷道凹凸不平的顶板。在每个小型立柱安装小型压力传感器,以监测顶梁与巷道顶板之间的压力值,小型液压立柱可根据实时的压力值控制液压立柱的上移或下降,实现临时支护设备的自适应控制。

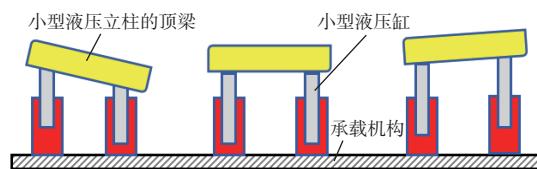


图 2 临时支架顶梁小型液压立柱工况

Fig. 2 Small hydraulic column operating condition of temporary support roof beam

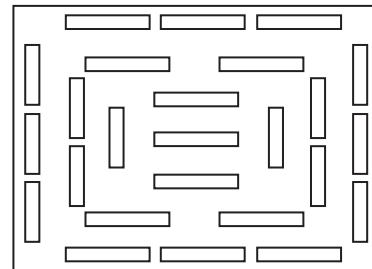


图 3 临时支架顶梁多层次小型液压立柱布置

Fig. 3 Multi-level small hydraulic column layout of temporary support roof beam

自移式临时支架采用“跨骑”方式布置在掘进机上,对掘进工作面进行临时支护,并通过液压控制实现与掘进机的自动跟随移动。在掘进机进行割煤和锚杆钻孔的过程中,巷道顶板因震动可能产生松动,此时,压力传感器和位移传感器实时监测支撑液压缸的位移参数及支架顶梁与巷道顶板之间的压力变化,并将这些数据传输至矿压监测大数据云平台。基于这些数据,自移式临时支架自适应控制系统对每个油缸端点的输出位移进行计算,并通过压力传感器进行实时监控,确保支架的稳定性和安全性。

2 自移式临时支架支撑力控制系统

为解决顶板压力变化后对顶板的弱支撑和过支撑问题,在工作面工作时,自移式临时支架必须具备适应顶板压力变化的能力,因此在支撑液压缸控制回路中增加压力调整回路,实时调整油液压力,建立

自移式临时支架支撑力控制系统。

自移式临时支架支撑力控制系统中的压力油使用单独的小排量泵进行供油,液压油的压力可以进行调整。当支撑液压缸在主油路压力油作用下达到指定位置和支撑力后,方向阀切回中位,此时支撑液压缸中油液压力稳定;当顶板压力增大时,活塞杆受到的压力增大,对无杆腔油液进行压缩,油液压力上升,此时液压表和顶板压力监测装置对调压回路中电液比例溢流阀输出电信号,调整溢流阀增大油液压力,同时电控换向阀左位联通,对支撑液压缸供高压油,提高液压缸支撑力,达到对应油液压力后,液压表输出信号,电控换向阀切回右位;当顶板压力减小时,高压油腔中油液压力降低,液压表和压力监测装置输出相应信号,溢流阀调定一个较低的压力,电控换向阀左位打开,小排量泵输出的液压油打开高压油腔连接的液控单向阀,高压油腔中高压油与小排量泵供给的低压油联通,对其进行降压,从而实现自适应控制的同步调节。自移式临时支架支撑力控制系统结构如图4所示。

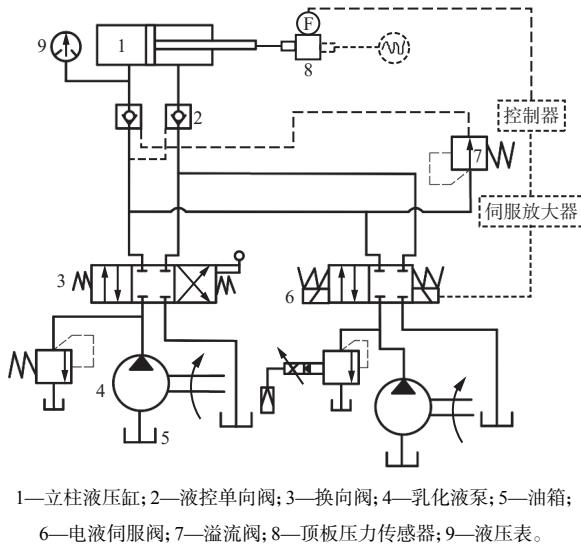


图4 自移式临时支架支撑力控制系统结构

Fig. 4 Structure of support force control system for self-moving temporary support

为了实现支撑液压缸的精确控制,自移式临时支架支撑力控制系统通过改变电液伺服阀的开口大小和方向来改变阀内油液压力,以满足系统对压力和流量的要求。因此,需要研究支撑液压缸输出力的数学表达式,并通过数学表达式研究支撑液压缸控制方法。将支撑液压缸、电液伺服阀和负载看作一个整体,并认为负载具有弹塑性,在进行模糊PID自适应控制时,需要用液压系统的电液伺服阀流量方程、支撑液压缸流量连续性方程及支撑液压缸负载力平衡方程计算控制对象的目标函数。假定电

液伺服阀与液压缸的连接长度均匀而短粗,管道动态和管中压力的影响忽略不计;工作腔中各部位的压强相同,且流体弹性模量、油温恒定;支撑液压缸内外部的泄漏气体均呈层流式流动^[3]。

电液伺服阀流量方程为

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

式中: Q_L 为液压缸输入流量; k_q 为电液伺服阀流量与阀芯位移比例增益系数; x_v 为阀心位移; k_c 为电液伺服阀流量与阀口油压比例增益系数; p_L 为供油压力。

支撑液压缸流量连续性方程为

$$Q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{tp} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (2)$$

式中: A_p 为支撑液压缸有效工作面积; x_p 为液压立柱油缸活塞位移; t 为响应时间; C_{tp} 为支撑液压缸总泄漏系数; V_t 为系统总压缩体积系数; β_e 为液压油弹性模量。

支撑液压缸负载力平衡方程为

$$F_g = A_p(p_1 - p_2) = A_p p_L = M_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (3)$$

式中: F_g 为支撑液压缸在油压作用时产生的驱动力; p_1 为支撑液压缸进油腔压力; p_2 为支撑液压缸回油腔压力; M_t 为活塞及负载的总质量; B_p 为活塞及负载的黏性阻尼系数; K 为负载的弹簧刚度; F_L 为作用在活塞上的任意外负载力。

根据式(1)—式(3)得出支撑液压缸的传递函数为

$$Y_p(S) =$$

$$\frac{-\frac{u_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e u_{ce}} S \right)}{\frac{V_t M_t}{4\beta_e A_p^2} S^3 + \left(\frac{M_t u_{ce}}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) S^2 + \left(1 + \frac{B_p u_{ce}}{A_p^2} + \frac{K V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) S + \frac{K u_{ce}}{A_p^2}} \quad (4)$$

式中: u_{ce} 为总的流量-压力系数; S 为复频率变量。

对支撑液压缸进行自适应控制时,支撑液压缸的位移作为输出量,且认定支撑液压缸系统没有阻尼和弹性负载,即 $B_p = 0$, $K = 0$, 2个因素忽略不计,对式(4)简化,得

$$Y_p(s) = \frac{-\frac{u_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e u_{ce}} S \right)}{S \left(\frac{\omega_h^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} S + 1 \right)} \quad (5)$$

式中: ω_h 为液压固有频率, $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t M_t}}$; ξ_h 为液压阻尼比, $\xi_h = \frac{u_{ce}}{A_p^2} \sqrt{\frac{\beta_e M_t}{V_t}} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e M_t}}$ 。

根据伺服系统支撑力控制开环方块图(图 5)求自适应控制系统的开环传递函数:

$$G(s) = \frac{d_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中 d_v 为开环放大系数。

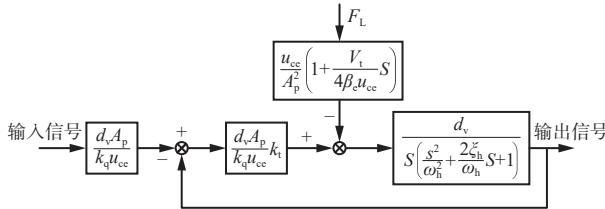


图 5 伺服系统支撑力控制开环方块图

Fig. 5 Open-loop block diagram of servo system support force control

3 模糊 PID 自适应控制系统模型

在支撑液压缸工作过程中,外部的环境及所施加的负荷都会随着实际情况的改变而改变,因此控制系统的参数也会发生改变,如果使用 PID 参数对支撑液压缸的工作状态进行调整,将影响控制能力^[21]。

为了使临时支架的支撑力(即支撑液压缸的输出力)能够快速稳定地跟踪预期值,引入模糊 PID 自适应控制器,通过模糊推理的方法及不同的误差 e 、累积误差 e_c 实现模糊 PID 自适应控制器的参数(比例增益变化 Δk_p 、积分增益变化 Δk_i 、微分增益变化 Δk_d)在线自动调节,满足不同的需求,从而使被控对象具有良好的动态和静态性能,以满足模糊 PID 自适应控制器迅速适应控制的实际需求^[21]。模糊 PID 自适应控制系统结构如图 6 所示。

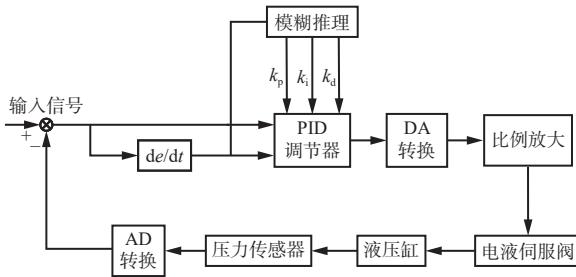


图 6 模糊 PID 自适应控制系统结构

Fig. 6 Structure of fuzzy PID adaptive control system

根据模糊 PID 自适应控制器给出的增益调整当前控制输出,通过离散 PID 控制算法,在每个采样时刻更新控制参数,从而实现实时调节。离散 PID 控制算法为

$$l(t) = k_p e(t) + k_i T \sum_{i=0}^t e(t) + k_d \frac{e(t) - e(t-1)}{T} \quad (7)$$

式中: $l(t)$ 为模糊 PID 自适应控制器的输出; k_p 比例增

益; $e(t)$ 为 t 时刻的误差; k_i 积分增益; T 为采样周期; k_d 微分增益。

3.1 输入值的模糊化

模糊 PID 自适应控制器控制 e 和 e_c 的模糊子集均为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中)}。通过引入量化函数,将 e 和 e_c 模糊集对应的论域定义为 {-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}, 采用线性方式量化将连续的输入信号映射到离散的输出信号,则线性方式量化函数关系为

$$f(e) = \frac{6e}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (8)$$

$$f(e_c) = \frac{6e_c}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (9)$$

式中: R_{\max} 为输出量化值的最大值; R_{\min} 为输出量化值的最小值。

利用量化函数对 e 和 e_c 进行量化,确定 e 和 e_c 在模糊子集上的隶属度,并通过隶属度确定模糊子集。 e 和 e_c 的三角隶属度函数如图 7 所示。

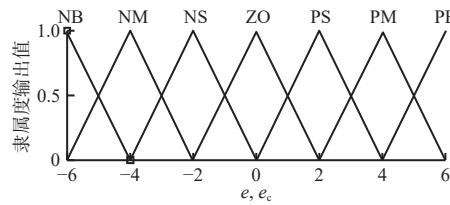


图 7 e 和 e_c 的三角隶属度函数

Fig. 7 Triangular affiliation function for e and e_c

若将信号输入值量化为 1, 则属于 ZO 的隶属度为 0.5, PS 对应的隶属度为 0.5。至此, 模糊化全部完成。

3.2 建立模糊规则表

根据模糊 PID 自适应控制器的 3 个参数的作用及特性,制定 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊控制规则,见表 1—表 3。

表 1 Δk_p 模糊规则

Table 1 Fuzzy rule for Δk_p

e	Δk_p						
	$e_c =$ NB	$e_c =$ NM	$e_c =$ NS	$e_c =$ ZO	$e_c =$ PS	$e_c =$ PM	$e_c =$ PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 模糊规则Table 2 Fuzzy rule for Δk_i

e	Δk_i						
	$e_c =$ NB	$e_c =$ NM	$e_c =$ NS	$e_c =$ ZO	$e_c =$ PS	$e_c =$ PM	$e_c =$ PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 Δk_d 模糊规则Table 3 Fuzzy rule for Δk_d

e	Δk_p						
	$e_c =$ NB	$e_c =$ NM	$e_c =$ NS	$e_c =$ ZO	$e_c =$ PS	$e_c =$ PM	$e_c =$ PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3.3 解模糊化处理

根据 e 和 e_c 的三角隶属函数, 使用同一个量化目标(也就是论域 $[-6, 6]$)对目标函数(自适应控制系统的开环传递函数)进行模糊化处理, 在输入值模糊化、建立模糊规则的基础上, 采用加权平均法计算模糊变量的量化值。

$$Q_0 = \frac{\sum_{a=1}^m E_a N_a}{\sum_{a=1}^m E_a} \quad (10)$$

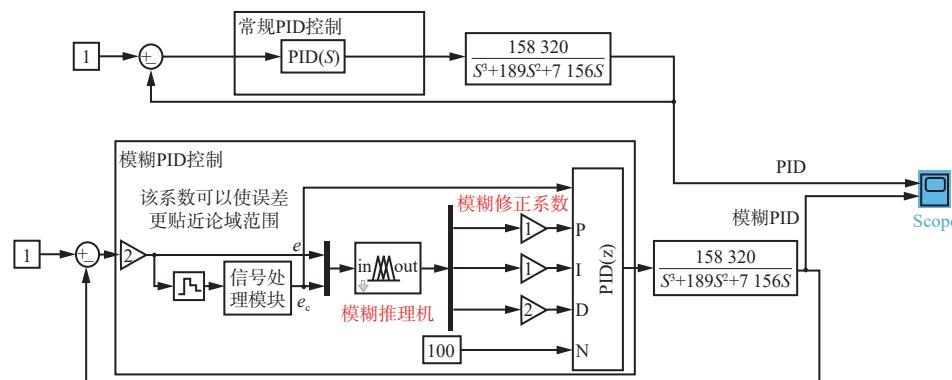


图 8 目标函数仿真模型

Fig. 8 Objective function simulation model

式中: Q_0 为清晰量化值; m 为模糊规则的总数; E_a 为第 a 条模糊规则的加权系数; N_a 为第 a 条模糊规则的模糊量化值。

4 模糊 PID 自适应控制系统模型仿真分析

针对模糊 PID 自适应控制系统的数学模型, 以顶板压力传感器测得的压力值作为输入值, 在 Matlab 仿真平台上分别采用传统 PID 控制和模糊 PID 自适应控制进行仿真实验, 仿真中选取的相关参数见表 4。

表 4 支撑液压缸参数

Table 4 Hydraulic cylinder system parameters

参数	数值
液压缸有效工作面积 A_p/cm^2	25.38
液压固有频率 $\omega_h/(rad \cdot s^{-1})$	121.53
为负载的弹簧刚度 $K/(N \cdot m^{-1})$	40 000
作用在活塞上的外负载力 F_L/N	3 000
活塞负载的黏性阻尼系数 $B_p/(kg \cdot s^{-1})$	800
伺服阀流量增益系数 $k_q/(L \cdot min^{-1} \cdot m^{-1})$	0.010 6
液压阻尼比 ξ_h	0.3~0.4
液压缸总质量 M_t/kg	6
阀芯位移 x_v/m	0.006
总压缩体积 V_t/cm^3	50.1

通过支撑液压缸的主要参数求得模糊 PID 自适应控制系统的开环传递函数为

$$G(S) = \frac{158 320}{S(S^2 + 189S^2 + 7 156S)} \quad (11)$$

根据式(11), 利用 Matlab 中 Simulink 模块的模糊逻辑工具箱和控制系统工具箱建立目标函数仿真模型, 如图 8 所示。

传统 PID 控制与模糊 PID 自适应控制系统的仿真结果如图 9 所示, 可看出引入模糊 PID 自适应控制后, 自移式临时支架自适应控制系统对围岩顶板

压力的跟踪效果较传统 PID 控制更好,临时支架自适应控制系统跟随围岩压力的误差为 0.0043,较传统 PID 控制降低了 86.11%。模糊 PID 自适应控制在 0.12 s 时就接近平稳,而传统 PID 控制在 8.685 s 时才接近平稳,说明模糊 PID 自适应控制响应速度比传统 PID 控制有较为明显的优势。

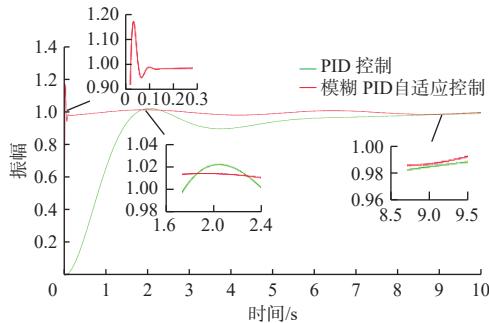


图 9 传统 PID 控制与模糊 PID 自适应控制曲线

Fig. 9 Traditional PID control and fuzzy PID adaptive control curves

在 AMESim 中建立支撑液压缸位移控制系统的物理模型,并设置系统的接口,以便与 Matlab/Simulink 中的控制算法相连接。基于 AMESim 的支撑液压缸位移控制系统仿真模型主要由支撑液压缸、伺服阀、位移传感器及质量块等组成,如图 10 所示。

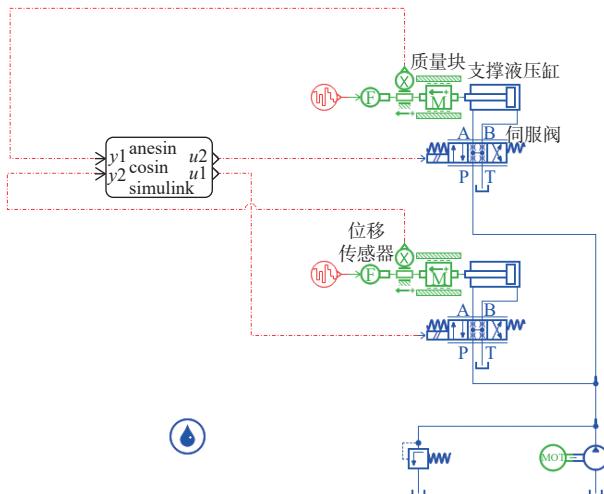


图 10 基于 AMESim 的液压缸位移控制系统仿真模型

Fig. 10 Simulation model of hydraulic cylinder displacement control system based on AMESim

在 Matlab/Simulink 中建立自适应控制系统的算法模型,主要包括位移解算模块、同步控制器、模糊 PID 自适应控制器、状态反馈模块及连接 AMESim 模型的接口模块等。基于模糊 PID 自适应控制的液压立柱响应位移曲线如图 11 所示,可看出当采用模糊 PID 自适应控制时,液压缸响应位移与所设定的预期位移(0.5 m)一致。

在调平过程中,选取相邻支撑液压缸之间的数

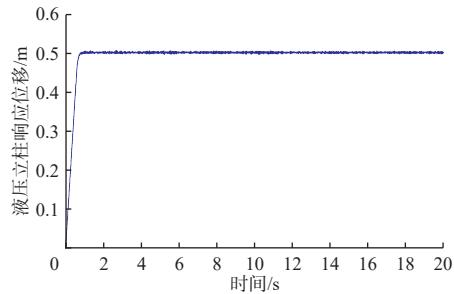


图 11 液压立柱响应位移曲线

Fig. 11 Hydraulic column response displacement curve

据进行研究分析,模糊 PID 自适应控制的同步误差如图 12 所示。可看出相邻支撑液压缸间的同步误差基本控制在 $\pm 5 \times 10^{-5}$ m 以内,其同步误差较传统 PID 控制方法(图 13)有较大降幅,且曲线波动均匀平缓,幅值波动范围较小。

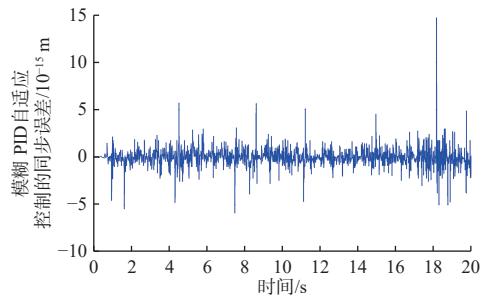


图 12 基于模糊 PID 自适应控制的相邻支撑液压缸间的同步误差

Fig. 12 Synchronization error between adjacent support hydraulic cylinders based on fuzzy PID adaptive control

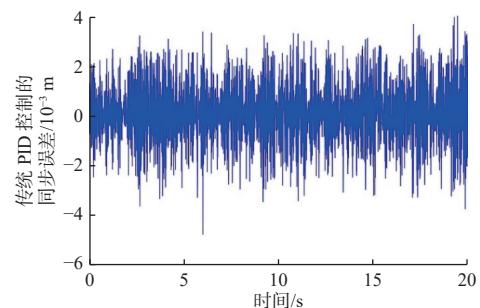


图 13 基于传统 PID 控制的相邻支撑液压缸间的同步误差

Fig. 13 Synchronization error between adjacent support hydraulic cylinders based on traditional PID control

5 结论

- 对自移式临时支架进行了结构自适应的设计,设计的顶梁结构采用多个层次的环状液压立柱来实现对顶板的适应,设计了临时支架自适应控制系统,介绍了自适应控制系统工作原理,通过液压系统的三大方程联合求解模糊 PID 自适应控制的目标函数。

- 在 Matlab/Simulink 模块中建立传统 PID 控制与模糊 PID 自适应控制系统模型,结果显示,模糊

PID 自适应控制在 0.12 s 时就接近平稳,而传统 PID 控制在 8.685 s 时才接近平稳。通过 AMESim 软件建立支撑液压缸位移控制系统模型,与 Matlab/Simulink 进行联合仿真,结果显示采用模糊 PID 自适应控制时,在同步精度上较传统 PID 控制方法有了较大提高,且曲线波动均匀平缓,幅值波动范围较小。

3) 需要注意的是,模拟仿真是在理想化的基础上完成的研究分析,由于一些实际限制(包括灰尘、湿度、风速及噪声)会对跟踪精度产生不利影响。在未来的工作中,将探索一种不受外界影响或受影响较小的控制策略。

参考文献(References):

- [1] 赵亚军,张志男,贾廷贵. 2010—2021年我国煤矿安全事故分析及安全对策研究 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 128-131.
ZHAO Yajun, ZHANG Zhinan, JIA Tinggui. Analysis of coal mine safety accidents and research on safety countermeasures in China from 2010 to 2021 [J]. Coal Technology, 2023, 42(8): 128-131.
- [2] 叶传卫. 巷道掘进临时支护装置在山南井的应用 [J]. 江西煤炭科技, 2024(2): 91-94.
YE Chuanwei. Application of temporary support device for roadway driving in Shannan Shaft [J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2024(2): 91-94.
- [3] 李瑞,蒋威,王鹏江,等.自移式临时支架的异步耦合调平控制方法 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(10) : 3625-3635.
LI Rui, JIANG Wei, WANG Pengjiang, et al. Asynchronous coupling approach for leveling control of self-shifting temporary support [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3625-3635.
- [4] 杨洋. AI 智能视频识别分析技术在智能化掘进的研究与应用 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(增刊 1): 26-28, 46.
YANG Yang. Research and application of AI intelligent video recognition analysis technology in intelligent excavation [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(S1): 26-28, 46.
- [5] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径 [J].煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [6] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状及趋势分析 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 1-11.
WANG Bukang. Current status and trend analysis of roadway driving technology and equipment in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 1-11.
- [7] 张国锋,曾升华,张春,等.旗山矿倾斜煤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 & Safety Engineering, 2011, 28(1): 22-27.
- [8] 康红普,姜鹏飞,高富强,等.掘进工作面围岩稳定性分析及快速成巷技术途径 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2023-2045.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, GAO Fuqiang, et al. Analysis on stability of rock surrounding heading faces and technical approaches for rapid heading [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2023-2045.
- [9] 马宏伟,王世斌,毛清华,等.煤矿巷道智能掘进关键共性技术 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310-320.
MA Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310-320.
- [10] 煤矿机器人重点研发目录 [EB/OL]. [2024-06-22] https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zt/2018zt/mkjqrlyfyy/zycz/201901/t20190111_223797.shtml. Key R&D Catalog of Coal Mine Robots [EB/OL]. [2024-06-22] https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zt/2018zt/mkjqrlyfyy/zycz/201901/t20190111_223797.shtml.
- [11] 史文萍. 基于模糊自适应 PID 控制在液压支架监控中的应用 [J]. 煤矿机械, 2011, 32(1): 196-198.
SHI Wenping. Application of controlling system for hydraulic support based on fuzzy adaptive PID control [J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(1) : 196-198.
- [12] 马长青,李峰,李先兴.自移式临时支护结构设计及液压系统研究 [J]. 煤炭技术, 2024, 43(4): 229-233.
MA Changqing, LI Feng, LI Xianxing. Design of self-moving temporary support structure and research on hydraulic system [J]. Coal Technology, 2024, 43(4) : 229-233.
- [13] 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.
- [14] 徐亚军,张坤,李丁一,等.超前支架自适应支护理论与应用 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3615-3624.
XU Yajun, ZHANG Kun, LI Dingyi, et al. Theory and

- application of self-adaptive support for advanced powered support[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3615-3624.
- [15] 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.
- [16] 任怀伟, 李帅帅, 李勰, 等. 液压支架顶梁位姿调控仿真分析[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 11-16.
REN Huawei, LI Shuaishuai, LI Xie, et al. Simulation analysis of roof beam position and attitude control of hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 11-16.
- [17] 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.
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.
- [18] 毛君, 郑广辉, 谢苗, 等. 模糊 PID 的超前支护装备支撑力自动控制系统[J]. 智能系统学报, 2015, 10(5): 762-768.
- [19] MAO Jun, ZHENG Guanghui, XIE Miao, et al. Fuzzy-PID based automatic support force control system of advance supporting equipment[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(5): 762-768.
- [20] 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 Yinan, GONG Dunwei. Asynchronous active disturbance rejection balance control for hydraulic support platforms[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 151-163.
- [21] 胡相捧, 刘新华, 庞义辉, 等. 基于 BP 神经网络 PID 的液压支架初撑力自适应控制[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(6): 662-671.
HU Xiangpeng, LIU Xinhua, PANG Yihui, et al. Adaptive control of setting load of hydraulic support based on BP neural network PID[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(6): 662-671.
- [22] 曹志强, 王英志, 胡俊, 等. 粒子群模糊 PID 交叉耦合电机同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(8): 57-61.
CAO Zhiqiang, WANG Yingzhi, HU Jun, et al. Moto synchronous control of fuzzy PID cross coupling based on PSO[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(8): 57-61.
- [23] 黄炳香, 王友壮. 顶板钻孔割缝导向水压裂缝扩展的现场试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2002-2008.
HUANG Bingxiang, WANG Youzhuang. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2002-2008.
- [24] 牛同会. 分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 50-59.
NIU Tonghui. Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 50-59.
- [25] 钟坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 煤矿坚硬顶板分段水力压裂防冲效果监测与评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(7): 2582-2593.
ZHONG Kun, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng, et al. Monitoring and evaluation of segmented hydraulic fracturing effect in rock burst prevention on hard roof of coal mine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7): 2582-2593.
- [26] 贾进章, 王东明, 李斌. 水力压裂有效压裂半径的影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(6): 58-64.
JIA Jinzhang, WANG Dongming, LI Bin. Study on influencing factors of effective fracturing radius of hydraulic fracturing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 58-64.
- [27] 钟坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 煤矿坚硬顶板分段水力压裂防冲效果监测与评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(7): 2582-2593.
ZHONG Kun, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 322-333.