

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.05.015

PSO-Fuzzy-IMC 算法在充填浓度控制中的应用

郭加仁, 齐兆军, 荆晓东, 李广波, 朱庚杰, 吴再海, 贾海波

(山东黄金矿业科技有限公司 充填工程实验室分公司, 山东 烟台 261400)

摘要:尾砂充填过程中存在大滞后、非线性和时变性特点,传统控制策略效果不佳,难以实现尾砂浓度精准控制,因此需要先进控制算法进行充填浓度的精准控制,提高浓度控制的稳定性。以某黄金矿山生产工艺为研究对象,建立充填浓度控制模型,提出了一种模糊内模控制策略,利用粒子群算法对模糊自适应参数进行在线辨识,在 MATLAB 中进行浓度控制系统仿真。与 IMC 算法和 Fuzzy-IMC 算法对比,优化后的模糊内模控制算法具有超调量小、鲁棒性高等优点,浓度控制响应速度快、稳定性高,在抗干扰性和稳定性方面优于内模控制和模糊内模控制算法,浓度控制误差在 2%,比内模控制算法提高 3%,明显提高系统的控制精度,更好地满足实际应用的要求。

关键词:尾砂充填;Fuzzy-IMC;浓度控制;PSO

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)05-0121-07

Application of PSO-Fuzzy-IMC Algorithm in Filling Concentration Control

GUO Jiaren, QI Zhaojun, JING Xiaodong, LI Guangbo, ZHU Gengjie, WU Zaihai, JIA Haibo

(Backfill Engineering Laboratory, Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai 261400, China)

Abstract: The tailings filling is a complex industrial process, which has the characteristics of large time lag, nonlinear and time variability. The traditional control strategy is not effective and it is difficult to achieve accurate control of concentration. Therefore, the advanced control algorithm is needed to control the filling concentration accurately and improve the stability of concentration control. The concentration control model is established based on the production process of a gold mine as the research object. A fuzzy internal model control strategy is proposed, and the PSO algorithm is used to identify the fuzzy adaptive parameters online. The concentration control system is simulated in MATLAB. Compared with IMC algorithm and fuzzy IMC algorithm, the optimized fuzzy internal model control algorithm has the advantages of small overshoot and high robustness. The concentration control has fast response speed and high stability. It is superior to IMC and Fuzzy-IMC algorithm in anti-interference and stability, the concentration control error is 2%, which is 3% higher than IMC algorithm, which can significantly improve the control precision of the system and better meet the requirements of practical applications.

Key words: tailings filling; Fuzzy-IMC; concentration control; PSO

随着金属矿山矿石品位逐年降低,为了保证实现营业收入的不断增长,处理量逐年增加,随之而来的是尾砂量逐年增加,如何对尾砂进行绿色环保处

理成为金属矿山亟需解决的问题。为了响应国家绿色矿山开采的号召,充填采矿法具有控制地压、提高矿石回收率等优点,已经成为金属矿山开采的主要

收稿日期:2021-09-17

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFC0604600)

Fund: Supported by the National Key R & D Program of the 13th Five Year Plan(2018YFC0604600)

作者简介:郭加仁(1984—),男,高级工程师,主要从事充填电气设计与软件开发。

引用格式:郭加仁,齐兆军,荆晓东,等. PSO-Fuzzy-IMC 算法在充填浓度控制中的应用[J]. 有色金属工程,2022,12(5):121-127.

GUO Jiaren, QI Zhaojun, JING Xiaodong, et al. Application of PSO-Fuzzy-IMC Algorithm in Filling Concentration Control[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 121-127.

采矿方法^[1-2]。

充填系统是一个复杂系统,涉及多个方面,主要包括胶凝材料选择、灰砂配比、充填料浆的制备及输送等各个环节^[3]。充填浓密脱水和料浆制备过程是一个复杂过程,涉及到复杂的反应机理,不同环节存在着延迟性、非线性、多变量等特点,尾砂在无动力深锥浓密机内与絮凝剂溶液进行絮凝沉降,无动力深锥浓密机系统的加入增加了控制系统的不确定性和复杂性;与此同时,料浆制备过程中,胶凝材料经粉料输送装置输送到卧式搅拌机,此过程具有明显的非线性特征,传统控制策略控制效果并不精准,造成充填浓度波动大,影响井下充填质量。因此需要采用先进控制理论和技术来实现充填浓度的精准控制,保证控制系统稳定运行。针对此种情况,本文提出一种改进内模控制方法,应用于浓度控制系统中,

满足充填控制要求,以达到工艺设计要求的各项经济指标^[4]。

1 工艺流程简介及模型建立

选厂处理后尾砂经渣浆泵打到一体机进行粗细分离,粗粒级尾砂经过皮带机运送到堆场,进行外销;细粒级尾砂通过渣浆泵打到无动力高效深锥浓密机,在无动力高效深锥浓密机内添加絮凝剂溶液进行絮凝沉降,浓密脱水后经管道输送至卧式搅拌机,按照设计要求,在卧式搅拌机内添加胶凝材料进行活化搅拌,通过卧式搅拌和立式搅拌进行充分搅拌,采用自流输送模式进行井下采空区充填,充填系统由FCS系统全流程自动控制,设备主要包括无动力高效深锥浓密机、卧式搅拌机、立式搅拌机、絮凝剂添加装置、粉料输送计量装置等,工艺流程图见图1。

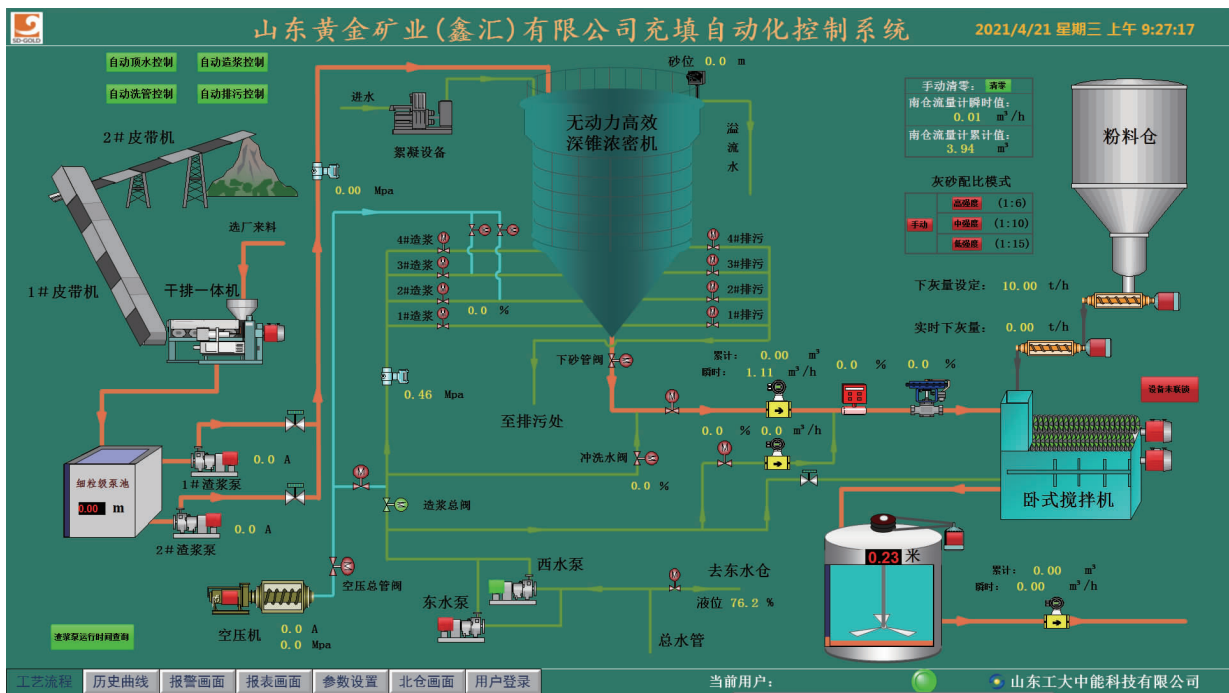


图1 充填工艺流程图

Fig. 1 Filling process flow chart

充填浓度是充填制备过程中极其重要的质量指标,易受尾砂粒径、配比等因素的影响,实际生产过程中以充填浓度为被控对象,浓度控制采用单回路控制方式,本文采用实验法推出数学模型,如图2所示。

在充填料浆制备过程中,灰砂配比、补加水量和底流尾砂浓度都影响最终充填浓度,当灰砂比确定时,补加水量直接影响充填浓度,也是较容易控制的变量,通过控制补加水量来实现对浓度的控制,降低

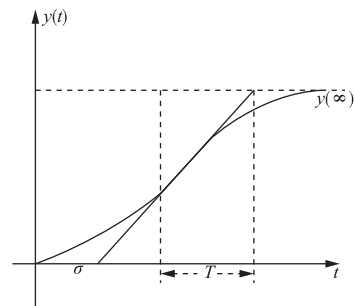


图2 浓度变化曲线图

Fig. 2 Concentration curve

了控制系统的耦合性和复杂性,料浆浓度由浓度计进行检测,并将检测信号送到 FCS 系统中,当浓度偏高或偏低时,PLC 控制器发送信号给电动调节

阀,使电动调节阀开大或者关小,从而使料浆浓度保持在合理范围内,保证充填质量。控制结构图如图 3 所示。

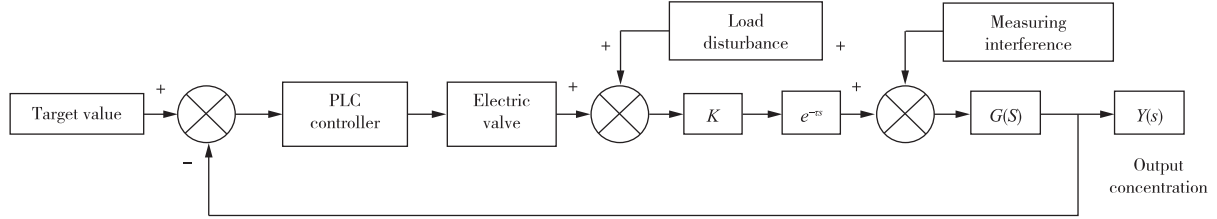


图 3 浓度反馈控制图

Fig. 3 Control chart concentration

结合图 3 可知,浓度控制过程可以等效为三阶系统和一个滞后环节,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中, $\frac{1}{(T_1s+1)}$ 为浓度计的动态特性; $\frac{1}{(T_2s+1)}$ 为电动调节阀的动态特性; $\frac{1}{(T_3s+1)}$ 为充填料浆搅拌过程的动态特性; $e^{-\tau s}$ 为检测仪表的延迟特性; K 为放大系数。

2 模糊内模控制器设计

2.1 内模控制

内模控制主要思想是将系统被控对象与模型进行并联,控制器逐渐趋近于对象模型的逆^[5],其基本控制结构^[6]如图 4 所示,其中系统输入为 $R(s)$,系统输出为 $Y(s)$,内模控制器为 $G_{IMC}(s)$,内部模型为 $G_M(s)$,被控对象为 $G_P(s)$,外部干扰信号^[7]为 $D(s)$,内模控制结构简单,抗干扰性强,适用于大时滞系统的控制。

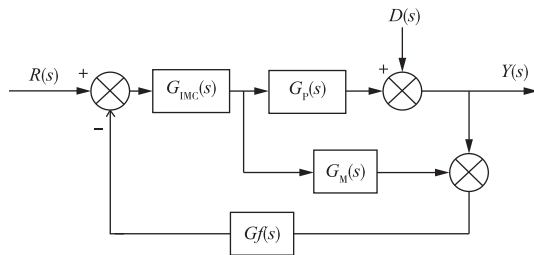


图 4 内模控制框图

Fig. 4 Structure of Internal model control

当 $G_f(s)=1$ 时,定义为 1 自由度的 IMC 系统^[8],否则为 2 自动度 IMC 系统,根据实际控制需要,采用 1 自由度 IMC,其传递函数为:

$$y = \frac{G_{IMC}(s)G_P(s)G_f(s)}{1 + G_{IMC}(s)(G_P(s) - G_M(s))}R(s) + \frac{1 - G_{IMC}(s)G_P(s)}{1 + G_{IMC}(s)G_f(s)(G_P(s) - G_M(s))}D(s) \quad (2)$$

将 $G_f(s)=1$ 带入上式可得:

$$y = \frac{G_{IMC}(s)G_P(s)}{1 + G_{IMC}(s)(G_P(s) - G_M(s))}R(s) + \frac{1 - G_{IMC}(s)G_P(s)}{1 + G_{IMC}(s)(G_P(s) - G_M(s))}D(s) \quad (3)$$

在内模控制器设计时,首先针对对象模型设计理想控制器;其次加入滤波器提高控制器分母多项式的阶次,易于工程实现^[9]。具体步骤如下:

1) 模型分解

将系统模型 G_m 进行分解:

$$G_m(s) = G_{m+}(s)G_{m-}(s) \quad (4)$$

式中, $G_{m+}(s)$ 是一个全通滤波器,满足 $|G_{m+}(j\omega)| = 1$,传递函数 $G_{m-}(s)$ 具有最小相位特点^[10]。

2) 控制器设计

在实际应用时,为了提高系统稳定性,增加滤波器环节,保证系统鲁棒性,内模控制器为:

$$G_{IMC}(s) = G_{m-}^{-1}(s)F(s) \quad (5)$$

$$F(s) = \frac{1}{(1 + T_i s)^n} \quad (6)$$

式中, T_i 为时间常数,调整时间常数 T_i 的大小,即可改变闭环系统的控制效果^[11],它影响着控制系统的优劣, n 为滤波器的阶次,一般与内部模型阶次相同。

2.2 内模控制器设计

将内模控制转换为单位负反馈系统,如图 5 所示。

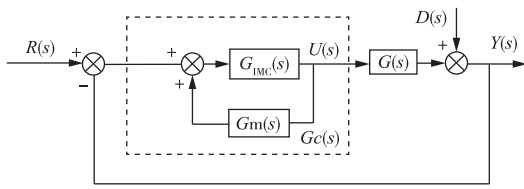


图5 等效内模控制框图

Fig. 5 Equivalent of internal model control

由图5可得传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)G_m(s)} \quad (7)$$

将式(5)和(6)带入(7)可得:

$$G_c(s) = \frac{1}{G_m^{-1}(s)(T_1s+1)^n - G_m(s)} \quad (8)$$

选取三阶延迟系统作为浓度控制的被控对象,由式(9)表示。

$$G_m(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}e^{-\tau s} \quad (9)$$

内模控制的滤波器阶数为3,采用Pade将滞后环节近似为^[12]:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} \quad (10)$$

将式(10)带入(9)可得:

$$G_m(s) = \frac{k(1 - \tau s/2)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(1 + \tau s/2)} \quad (11)$$

由式(4)可得:

$$G_m^{-1}(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} \quad (12)$$

$$G_{m+}(s) = \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} \quad (13)$$

则反馈控制器为:

$$G_c(s) = \frac{(2 + \tau s)(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}{k(2 + \tau s)[(1 + T_1s)^3 - (2 - \tau s)]} \quad (14)$$

2.3 模糊内模控制器设计

模糊控制器具有模糊推理和决策过程的智能控制方法^[13],将模糊控制与IMC算法结合,IMC控制器消除扰动信号,模糊控制器根据误差 e 和误差变化率 ec ,调整内模控制器参数,适应被控对象模型的改变。Fuzzy-IMC结构图如图6所示,当模型失配严重时,增大滤波器时间常数,将降低系统响应速度,因此需要选择较小的滤波器时间常数。

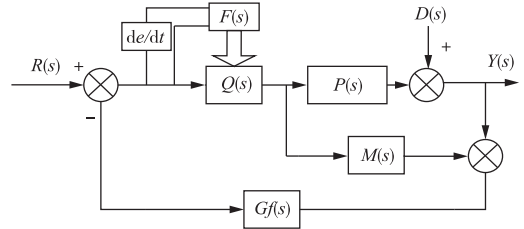
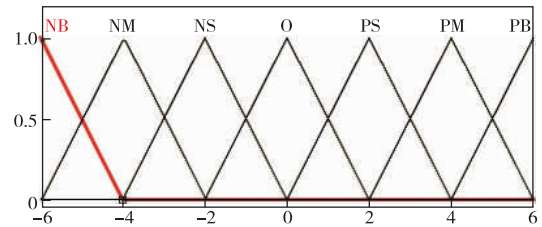
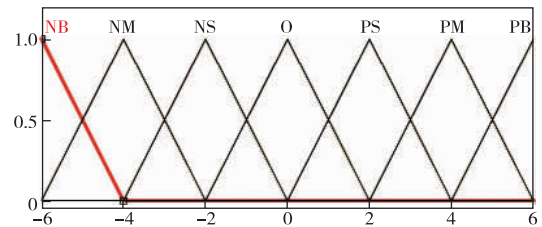
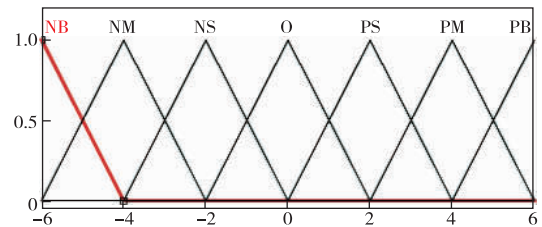


图6 模糊内模控制器结构图

Fig. 6 Fuzzy internal model controller structure diagram

1) 模糊化处理

模糊控制器输入选取浓度误差 e 和误差变化率 ec ,输出为滤波器时间常数 T' ,分别建立7个模糊语言变量(负大,负中,负小,零,正小,正中,正大),分别用{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}表示,输入论域为 $[-6, 6]$,输出论域为 $[-6, 6]$,隶属度函数分别用图7、8、9表示。

图7 误差 e 的隶属度函数Fig. 7 Membership function of error e 图8 误差变化率 ec 的隶属度函数Fig. 8 Membership function of error rate ec 图9 输出 U 的隶属度函数Fig. 9 Membership function of Output U

2) 模糊推理

模糊控制规则采用Mamdani,规则如表1所示,由被控过程可知,响应时间越小,系统响应越快,反之亦然。

表 1 滤波器时间常数模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table of filter time constant

T'	E							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
EC	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PS	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PB	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

3) 清晰化处理

本文采用重心法,表达式为

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_c(Z_i) Z_i}{\sum_{i=0}^n \mu_c(Z_i)} \quad (13)$$

式中, Z_0 为输出变量的精确值, Z_i 为量化值, $\mu_c(Z_i)$ 是 Z_i 的隶属度值。

3 粒子群优化模糊内模控制器

3.1 粒子群优化

粒子群优化算法(PSO)源于对鸟群捕食的行为研究^[14],具有规则简单、搜索速度快等优点。PSO 寻优原理是初始化粒子,然后进行迭代搜寻,通过迭代,粒子得到最优解,即得到个体极值 P_{best} 和群体全局极值 G_{best} ,不断调整速度和位置,最终在搜索空间得到最优值^[15-16]。

速度更新公式:

$$V_{id}^{k+1} = \omega(k) V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (14)$$

位置更新公式:

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (15)$$

惯性权重公式:

$$\omega(k) = \frac{\omega_s - (\omega_s - \omega_e)(k_m - k_n)}{k_e} \quad (16)$$

式中, ω_s 为起始惯性系数, ω_e 为终止惯性系数, k_n 为迭代次数, k_m 为最大迭代次数, r_1 、 r_2 为 0~1 间的随机数。

3.2 PSO 优化模糊内模算法

PSO 优化时,利用每个粒子当前速度和位置,通过迭代,计算出每个粒子的最优值和全局最优解,寻优目标函数达到最小时算法结束。本文采用绝对误差积分准则(ITAE)作为寻优目标,其函数表达式为:

$$J = \int_0^\infty t(|e(t_1)| + |e(t_2)|) dt \quad (17)$$

粒子群优化模糊内模控制流程如图 10 所示。

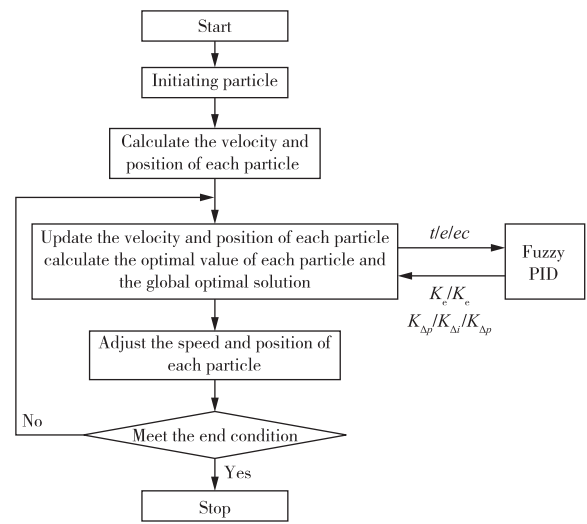


图 10 粒子群优化模糊内模流程图

Fig. 10 Flow chart of PSO fuzzy PID

4 仿真研究与结果分析

通过分析可知,浓度控制回路存在严重的滞后现象,结合被控对象动态特性和响应特性,浓度控制过程等效为三阶系统加上滞后环节^[17],传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{(0.5s+1)(0.2s+1)(6s+1)} e^{-6s} \quad (18)$$

在 Simulink 中搭建仿真模型进行试验,输入信号取幅值为 75 的阶跃信号,PID 参数为 $K_p=0.9$ 、 $K_i=0.1$ 、 $K_d=1.5$,传统内模控制时,滤波器常数 $T_f=2.3$ 时效果最佳,对于模糊内模控制器,初始值 $K_{p0}=2.56$ 、 $K_{i0}=0.27$ 、 $K_{d0}=1.3$ 、 $T_f=1.2$;利用 PSO 优化模糊内模控制器,粒子种群数量为 500,粒子维数为 3,量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_{dp} 、 K_{di} 和 K_{dd} 初始值为 $[1, 1, 0.58, 0.034, 1.38]$,最大迭代次数为 50,速度范围为 $[-1, 1]$,加速常数 $c_1=c_2=1$,位置范围为 $[-4, 4]$,优化后得到参数为: $K_{dp}=3.1$ 、 $K_{di}=5.12$ 、 $K_{dd}=5.23$ 、 $T=1.56$,仿真曲线如图 11 所示。

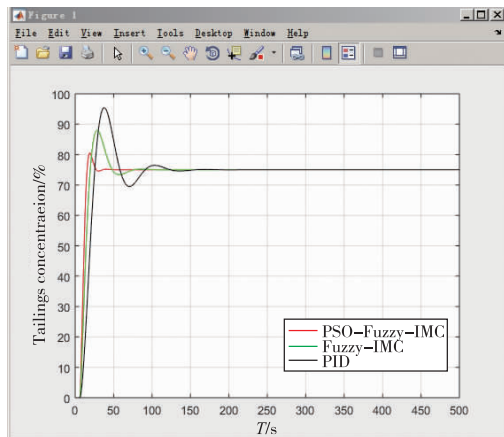


图 11 阶跃信号仿真对比

Fig. 11 Step response comparison

从图 11 对比分析发现,传统内模算法和模糊内模算法控制下浓度超调量较大,分别在 120 s 和 65 s 左右到达稳定状态,PSO 优化模糊内模控制算法超调量最小,响应速度快,在 25 s 左右到达稳定状态,调节时间更短,其控制性能最优,能够满足充填过程中浓度控制要求,性能指标对比如表 2 所示。

表 2 三种控制算法仿真曲线对比

Table 2 Simulation curve in three control algorithms

System	Rise time/s	Adjust time/s	Overshoot amount/%
IMC	45	120	16.7
Fuzzy-IMC	35	65	11.7
PSO-Fuzzy-IMC	19	25	6

在实际充填过程中,尾砂浓度控制回路存在很多干扰,为了验证 PSO 优化模糊内模算法的抗干扰特性,在仿真时人为加入一定量的干扰,模拟现场环境,在 200 s 时加入干扰量,干扰量为设定值的 20%,仿真曲线如图 12 所示。

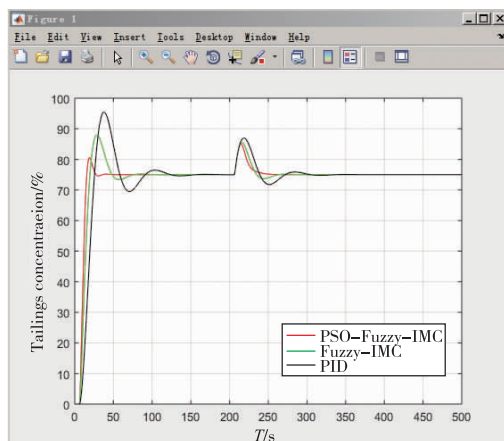


图 12 20%干扰下阶跃响应对比

Fig. 12 Comparison of step response under 20% interference

由图 12 可知,当生产过程中存在干扰时,内模算法和模糊内模控制算法调节速度慢,效果不好,PSO 优化模糊内模控制算法波动较小,重新达到稳定所需的时间最短。由此可见,相对传统内模算法和模糊内模算法,PSO-模糊内模控制算法具有较强的抗干扰特性。

5 结论

1) 充填过程中存在大滞后、非线性和时变性特点,常规算法难以实现充填浓度的精准控制,结合生产实际,建立尾砂充填浓度控制模型,提出了一种模糊内模控制策略,利用粒子群算法对参数进行在线辨识,并在 MATLAB 中进行仿真。

2) 仿真结果表明,与常规 IMC 算法和 Fuzzy-IMC 算法相比,粒子群优化模糊内模控制算法具有超调量小、鲁棒性高等优点,浓度控制响应速度快,稳定性高,在抗干扰性和稳定性方面均具有优势,能够满足充填控制系统要求。

3) 在实际充填过程中,采用常规内模控制算法,充填浓度波动较大,浓度误差控制在 5% 左右。采用 PSO 优化模糊内模控制算法,浓度误差控制在 2% 左右,浓度控制误差提高 3%。在灰砂比为 1:6 情况下,PSO 优化模糊内模控制算法控制充填时,充填体 3 d 强度达到 1.23 MPa,而常规 PID 算法和模糊内模控制算法控制充填时,充填体 3 d 强度达到 0.86 和 0.97 MPa,PSO 优化模糊内模控制算法提高了充填体强度,缩短采空区进采等待时间。同时,在灰砂比为 1:6 情况下,PSO 优化模糊内模控制算法浓度控制稳定,降低胶凝材料消耗量,每月可节省胶凝材料 635 kg,节约充填成本。

参考文献:

- [1] 贺桂成,刘永,丁德馨,等. 废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1): 74-79.
HE Guicheng, LIU Yong, DING Dexin, et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 74-79.
- [2] 常庆粮,周华强,柏建彪,等. 膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2): 279-282.
CHANG Qingliang, ZHOU Huaqiang, BAI Jianbiao, et al. Stability study and practice of overlying strata with paste backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,

- 2011,28(2):279-282.
- [3] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006:24-28.
GU Desheng, LI Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 24-28.
- [4] 王新民,古德生,张钦礼.深井矿山充填理论与管道输送技术[M].长沙:中南大学出版社,2010:1-6.
WANG Xinmin, GU Desheng, ZHANG Qinli. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mine [M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 1-6.
- [5] 常峰,旷文珍,陆帅.内模控制在温度控制传感器系统中的应用[J].传感器与微系统,2016,35(5):149-153.
CHANG Feng, KUANG Wenzhen, LU Shuai. Application of internal model control in temperature control sensor system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(5): 149-153.
- [6] 齐菲.多变量内模控制的仿真研究[D].北京:北京化工大学,2008.
QI Fei. The simulation research on multivariable internal model control algorithm [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [7] 肖强,谢巍.针对时滞系统的一般化内模控制方法[J].自动化学报,2011,37(4):464-470.
XIAO Qiang, XIE Wei. A GIMC architecture for time-delay systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(4): 464-470.
- [8] 刘青震,王文标,汪思源,等.基于改进内模的纸浆浓度控制[J].包装工程,2020,41(11),196-200.
LIU Qingzhen, WANG Wenbiao, WANG Siyuan, et al. Pulp cocentration control based on improved internal mold [J]. Packaging Engineering, 2020, 41 (11), 196-200.
- [9] 马昌浩.主汽温系统的内模控制策略及其工程实现[D].北京:华北电力大学,2018.
MA Changhao. Internal model control strategy of main steam temperature system and its engineering realization [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [10] 韩宁青.600 MW超临界机组给水控制系统内模控制算法研究[D].北京:华北电力大学,2011.
HAN Ningqing. Research on internal model control algorithm in 600 MW supercritical unit feed water control system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [11] 井海明.回转炉炉温控制算法的研究[D].天津:天津工业大学,2017.
JING Haiming. Research on temperature control algorithm of converter [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [12] YING L, BO Z, YING F, et al. Sensorless control with two types of pulsating high frequency signal injection methods for SPMSM at low speed [C]//International Conference on Power Electronics Systems & Applications. IEEE, Hong Kong, China, 2011.
- [13] 王金平,红军.自适应模糊PID控制在火电厂给水加药中的应用[J].自动化与仪表,2010(5):31-34.
WANG Jinping, HONG Jun. Application of feedwater and dosing for powerplant based on adaptive Fuzzy PID control [J]. Automation and Instrumentation, 2010(5): 31-34.
- [14] 杨洋,张秋菊.粒子群算法自寻优模糊PID控制器设计[J].机械制造与自动化,2018,47(3):201-204.
YANG Yang, ZHANG Qiujun. Design of self-optimizing fuzzy-PID Controller with particle swarm algorithm [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2018, 47(3): 201-204.
- [15] CHATTERJEE A, SIARRY P. Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(3): 859-871.
- [16] 丁洁森.燃烧器温度控制系统研究[D].西安:西北工业大学,2004.
DING Jiemiao. Research on temperature control system of burner [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [17] 卓凌波.智能PID算法在矿山充填自动控制中的研究与应用[D].长沙:湖南师范大学,2016.
ZHUO Lingbo. Reserach on intelligent PID algorithm and its application in automatic control of mine filling [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016.

(编辑 郭文晶)