

基于模拟退火粒子群混合算法的纸浆浓度控制系统

汤伟^{1,2}, 胡祥满¹, 孙小乐¹

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 陕西农产品加工技术研究院, 西安 710021)

摘要: **目的** 为了得到最优的控制器参数, 以满足纸浆浓度实际控制要求, 更好地克服控制难点。**方法** 提出一种模拟退火粒子群混合算法, 并应用于纸浆浓度控制系统, 对其 PID 控制器参数进行整定优化, 基于 MATLAB 的 .m 程序和 Simulink 进行仿真, 并与其他整定方法进行比较。**结果** 该优化方法能够得到较为理想的控制效果, 系统过度平稳、响应快、超调小、调整时间短、鲁棒性好, 其输出响应曲线上升时间为 9 s, 超调量为 3.07%, 调整时间为 22.8 s。**结论** 基于此混合算法的优化控制, 不仅兼顾 2 种算法各自的优点, 且相对于二者各自的优化控制及传统整定方法具有显著优越性, 可以更好地满足现场控制要求。

关键词: 纸浆浓度; 控制系统; 模拟退火; 粒子群优化

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0015-06

The Control System of Pulp Concentration Based on the Hybrid Algorithm of Simulated Annealed Particle Swarm Optimization

TANG Wei^{1,2}, HU Xiang-man¹, SUN Xiao-le¹

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Research Institute of Agricultural Products Processing Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the optimal controller parameters to meet the actual requirements and overcome the difficulties in the control process of pulp concentration. A hybrid algorithm of simulated annealed particle swarm optimization was proposed and applied to the pulp concentration control system for tuning and optimizing the PID controller parameters. Simulations were done based on .m program and Simulink in MATLAB and comparison to other tuning methods was made. This optimization method could get relatively ideal control effect and the system was featured by stable transition, fast response, low overshoot, short adjusting time and good robustness. The rise time of the output response curve was 9 s, the overshoot was 3.07%, and the adjusting time was 22.8 s. It was concluded that the optimal control based on this hybrid algorithm has not only the advantages of both algorithms and is significantly superior to them with respect to their respective optimal control and traditional tuning methods, which can better meet the requirements of field control.

KEY WORDS: pulp concentration; control system; simulated annealed; particle swarm optimization

纸浆浓度是制浆造纸过程中一个重要的过程参数, 纸浆浓度的稳定性决定着最终成纸的质量, 因此稳定且精确地控制纸浆浓度是自动化造纸的一项艰巨任务。在造纸过程中, 纸浆浓度的控制过程实际上是一个大时滞过程, 且因实际工艺过程中存在各种不确定因素, 不能唯一且准确建立过程模型, 对纸浆浓度进行控制存在一定难度。目前, 纸浆浓度控制大多

仍采用 PID 控制器, PID 控制器结构简单、鲁棒性好、可靠性高^[1-2], 且使用方便, 但由于在实际工艺过程中, 参数具有一定的时变性, 故有时 PID 的控制参数可能达不到理想的优化运行效果, 因此很有必要得到更优秀的控制器参数。传统常规 PID 参数整定方法如经验法、Ziegler-Nichols(Z-N)^[3]法、衰减曲线法、响应曲线法等, 也很难克服由于纸浆浓度控制过程的非

收稿日期: 2017-01-08

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划 (2014KCT-15); 陕西省科技统筹创新工程计划 (战略性新兴产业重大产品(群)) (2016KTCQ01-35)

作者简介: 汤伟(1971—), 男, 博士, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为制浆造纸全过程自动化、工业过程高级控制、大时滞过程控制及应用。

线性、时变性、大时滞等特征带来的问题^[4]。文中提出了一种基于模拟退火和粒子群优化混合算法整定优化 PID 参数的思想,利用智能算法的全局优化特性和 MATLAB 对智能算法的易实现性,进行 PID 参数优化并用于纸浆浓度的优化控制,旨在传统方法的基础上,获得具有更好的控制系统性能的控制参数。仿真结果比较分析也表明了该优化方法的有效性和优越性。

1 纸浆浓度控制系统

1.1 纸浆浓度控制系统组成

纸浆浓度控制系统见图 1,以进入配浆箱前的浓度控制环节为例,浆池的纸浆通过送浆泵输送到配浆箱,冲浆泵前配有稀释水管道,在稀释水入口管道(白水管道)上安装有调节阀,在冲浆泵到配浆箱入口前

的水平管道上安装有刀式浓度计,检测浓度信号并输入控制器,控制器据浓度检测信号和设定值间的偏差,产生调节信号去控制调节阀的开度来控制稀释水管道上的白水量^[5],整体构成浓度反馈调节控制系统,达到纸浆浓度良好稳定的控制效果,浓度反馈调节控制系统见图 2。

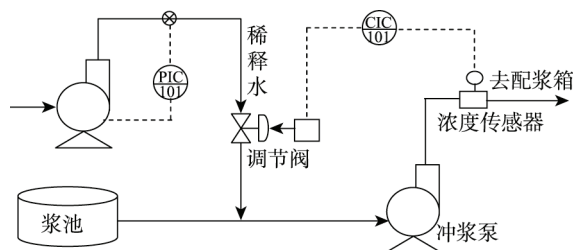


图 1 纸浆浓度控制系统

Fig.1 Schematic diagram of the pulp concentration control system

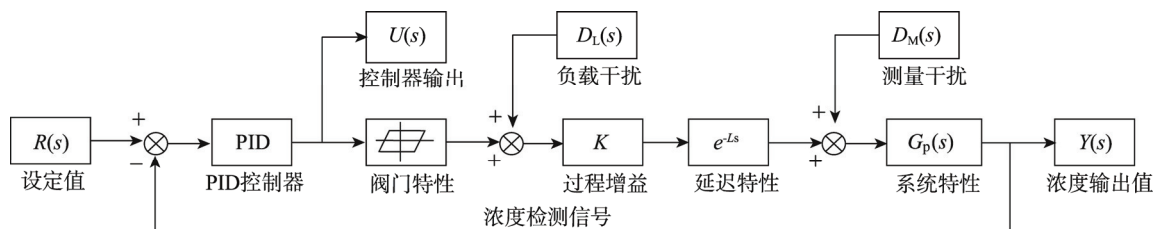


图 2 浓度反馈调节控制系统

Fig.2 Diagram of the closed-loop system for pulp concentration control

1.2 控制对象模型

由图 2 可知,要得到浓度过程对象的一般模型,必须知道各个子环节的表达式,此处应不考虑负载干扰 $D_L(s)$ 和测量干扰 $D_M(s)$ 。另外,阀门齿隙特性依阀门的结构和质量不同而不一致^[6],故也忽略阀门的这一属性,则对于系统广义过程对象模型,现只需知道 $G_P(s)$,即纸浆浓度调节过程的动态特性。从实际浓度调节动作考虑,实际上 $G_P(s)$ 包括 3 个环节,即阀门动态特性、稀释水与纸浆的混合过程、浓度变送器动态特性,且均为一节惯性环节,则 $G_P(s)$ 可由式(1)表示。

$$G_P(s) = \frac{1}{(T_V s + 1)(T_P s + 1)(T_S s + 1)} \quad (1)$$

式中: T_V , T_P , T_S 分别为这 3 个环节的时间特性系数。据图 2 及控制理论可得系统过程对象的传递函数:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{(T_V s + 1)(T_P s + 1)(T_S s + 1)} e^{-Ls} \quad (2)$$

式中: $Y(s)$, $U(s)$, $D_L(s)$, $D_M(s)$, $R(s)$ 分别是浓度检测值、控制器输出、负载干扰、测量干扰、浓度设定值的拉普拉斯变换; K 为过程增益; e^{-Ls} 为阀门与传感器间的延迟特性。

因实际中 $\frac{1}{(T_V s + 1)}$, $\frac{1}{(T_P s + 1)}$, $\frac{1}{(T_S s + 1)}$ 不易分别得到,且 T_V , T_P 与 T_S 相比较小,则 3 项的乘积可近似用 $\frac{1}{(T_S s + 1)}$ 来代替(即令 $T = T_S$),故得到浓度控制系统过程对象的一般简化模型见式(3)。即比例环节、一阶惯性环节和纯滞后环节。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)} e^{-Ls} \quad (3)$$

1.3 难点与要求

纸浆浓度控制的主要难点:非线性,主要是浓度的实际检测值与变送器 4~20 mA 电信号映射关系的非线性,这造成浓度的检测误差而影响控制系统的准确性;时变性,实际生产过程存在各种影响因素,使过程对象模型存在一定的时变与不确定性,则对控制系统的鲁棒性要求更高;时滞性,控制作用与过程响应间的时滞性会大大增加控制难度。纸浆浓度控制还必须要求:稳定性,这是保证纸幅均匀成形和成纸合格的必然要求;准确性,纸浆浓度会直接影响纸张定量,因此控制系统必须保证纸浆浓度的准确控制。鉴于这些控制难点与要求,基于常规方法的 PID 控制往往难以达到理想效果,故非常有必要寻求新的优化控制方法。

2 SA-PSO 混合算法

2.1 模拟退火算法

1) Metropolis 准则。统计热力学研究表明, 在温度 T 、粒子停留在状态 r 满足 Boltzmann 概率分布^[7]:

$$P_r(E(r)) = \frac{1}{Z(T)} \exp\left[-\frac{E(r)}{k_b T}\right] \quad (4)$$

式中: $E(r)$ 为状态 r 的能量; 概率分布常数 $k_b > 0$; T 为热力学温度; $Z(T)$ 为概率分布标准化因子, 计算见式(5)。

$$Z(T) = \sum_{h \in Q} \exp\left[-\frac{E(h)}{k_b T}\right] \quad (5)$$

式中: h 为状态空间 Q 中的一个状态; $E(h)$ 为状态 h 的能量。

Metropolis 准则叙述如下: 假设系统当前状态为 i , 能量为 $E(i)$, 经退火过程得到一个新的状态 j , 能量为 $E(j)$; 若 $E(j) < E(i)$, 则状态 j 优于状态 i ; 若 $E(j) > E(i)$, 考虑到热运动的影响, j 是否为更优状态要据固体处于该状态的概率来判断, 取处于状态 i 和 j 的概率比值 γ , γ 的计算见式(6)。

$$\gamma = \frac{P_j(E(j))}{P_i(E(i))} = \exp\left(-\frac{E(j) - E(i)}{k_b T}\right), \quad \gamma < 1 \quad (6)$$

用随机数产生器在 $[0, 1]$ 区间上产生一个随机数 ξ , 若 $\gamma > \xi$, 则仍接受状态 j 为更优状态, 把状态 j 作为当前状态, 否则不替换, 仍把状态 i 作为当前状态; 以此重复产生新状态, 用更优状态替换当前状态, 直到系统处最优状态。

2) 模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法是对统计热力学中固体退火过程的模拟, 思想是将问题的目标函数 $f(x)$ (或适应度函数) 作为能量函数 $E(r)$, 在当前温度 $T(k)$ 下作随机搜索, 经 Metropolis 准则找到局部优解; 算法在冷切进度表参数控制下, 结合概率突跳特性, 最终在解空间 S 中找到目标函数的全局最优解^[8], 理论上是以概率 1 收敛于全局最优解的随机搜索算法^[9], 其流程见图 3。

2.2 粒子群优化

Kennedy 和 Eberhart 提出的粒子群优化^[10] (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法见图 4。在解空间中先初始化一个规模 (粒子个数) N 和维度 (变量个数) D 的粒子群 $X = X_{N \times D} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N)^T$, 每个粒子代表解空间一个解; 算法据当前的粒子位置 $X_i = X_{1 \times D}$, 速度 $v_i = v_{1 \times D}$, 进行适应度评价, 从而找出当前个体最优 $P_i = P_{1 \times D}$ 和群体最优 $G = G_{1 \times D}$; 每次迭代和最优解更新后, 对粒子速度和位置分别按式(7)和(8)进行更新^[11], 再继续寻优直到找到满足要求的全局最优解。

$$v_i^{n+1} = w v_i^n + c_1 r_1 (P_i^n - X_i^n) + c_2 r_2 (G^n - X_i^n) \quad (7)$$

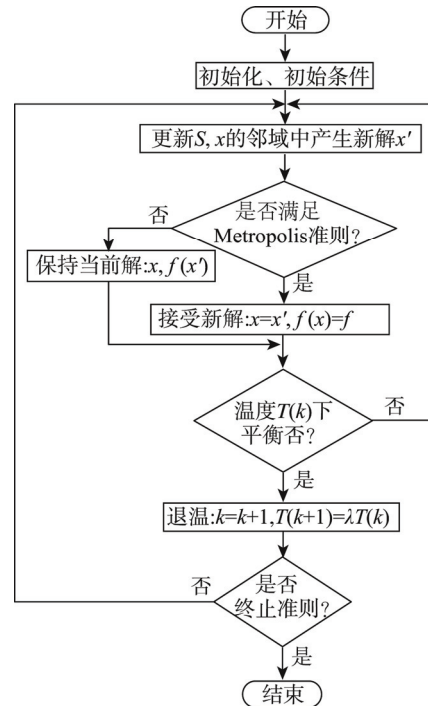


图3 SA 算法流程

Fig.3 Flow block diagram of SAA

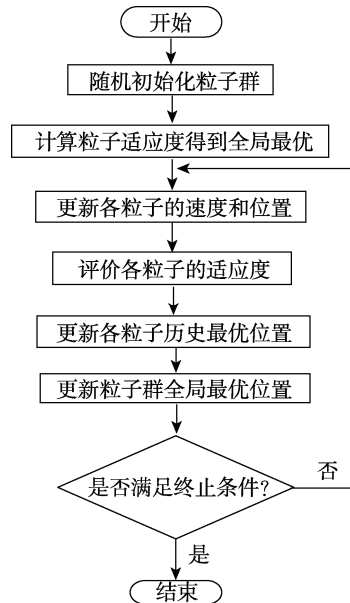


图4 PSO 算法流程

Fig.4 Flow block diagram of PSO

$$X_i^{n+1} = X_i^n + v_i^{n+1} \quad (8)$$

式中: n 表示第 n 次迭代, $n=0, 1, \dots, M$ (最大迭代次数); $i=1, 2, \dots, N$; w 为惯性权系数; c_1, c_2 为学习因子, 一般取 $c_1=c_2$; r_1, r_2 是均匀分布在 $[0, 1]$ 上的随机数且相互独立。

2.3 SA-PSO 混合算法

SAA 最大优点是优化中以概率接受和摒弃局部劣解, 跳出局部最优能力强, 收敛性和准确性好, 且算法原理结构简单、参数少、易实现; 但对多维度多变量问题的方便性欠佳且运算复杂度稍大。基本 PSO

虽所需参数少而易实现,且适用于组合优化、非线性、多极点和不可微多维度多变量复杂优化问题的求解^[12];但 PSO 是一个正反馈过程,易陷入局部最优^[13],算法在收敛的前提下种群多样性可能会逐渐减小,优化出现停滞状态而导致早熟^[14]与后期收敛性差,不利后期全局最优的精确搜索,其适应性和精度显著降低。

文中将 SA 和 PSO 算法结合,形成的 SA-PSO 混合算法见图 5。实际以 PSO 为算法主体流程框架,将 SAA 的模拟退火机制引入,而使两者有机结合,充分利用 SA 和 PSO 各自的优点,显著提高算法整体的准确性和解的优越性。SA-PSO 混合算法的整体寻优机制由 3 部分组成:PSO 主体流程用具有动态参数 w, c_1, c_2, r_1, r_2 的式(7)~(8)对粒子进行更新,产生优良粒子群体;解的更新机制由适应度函数和 SA 的 Metropolis 准则共同作用;SA 的退火机制和进程使粒子局部寻优并跳出局部最优,反复迭代直到终止。其基本优化流程简单描述为:Step1, 初始化参数,即给定粒子群 N, D , 限定 w, c_1, c_2 范围, M , 退温系数 λ 、初温 $T(0)$ 等;Step2, 随机初始化粒子群 X , 即初始化粒子的位置 X_i 和速度 $v_i, i=1, 2, 3 \dots N-1, N$;Step3, 评价每个粒子的适应度值,比较得到个体极值 pbest 和群体极值 gbest;Step4, 判定终止条件,若满足输出结果并结束算法,否则执行下一步;Step5, 检验内循环是否达到指定迭代次数,若满足则转到 Step10, 否则执行 Step6;Step6, 据式(7)~(8)更新粒子速度和位置;Step7, 评价更新后各粒子的适应度值;Step8, 计算更新前后 2 个位置引起的适应度值差 Δf , 据 Metropolis 准则, 决定是否接受新的位置和速度, 若不接受返回 Step6;Step9, 更新寻优结果 pbest 和 gbest;Step10, 令 $k=k+1, T(k+1)=\lambda T(k)$ 退温, 返回 Step4。

3 混合算法的实现

3.1 基于 SA-PSO 的纸浆浓度优化控制

运用混合算法对纸浆浓度进行优化控制见图 6, 即利用算法的全局搜索寻优能力, 在参数限定的范围内找出一组使控制系统性能评价指标最优的 PID 参数 K_p, K_i, K_d 。

选取适应度函数 f 。优化控制关键是评价其系统性能, 而系统性能评价指标又不唯一, 故需采用能体现综合性能的指标。常用的综合性能评价指标是系统偏差 $e(t)$ 与时间 t 之间的关系^[15]: 时间绝对偏差积分(ITAE)、时间偏差平方乘积分(ITSE)、绝对偏差积分(IAE)、平方偏差积分(ISE)。综合实际和各指标差异, 文中选取 ITAE 指标作为适应度函数(目标函数), 见式(9)。

$$f = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (9)$$

为便于编程, 将式(9)做离散化近似: 取足够大

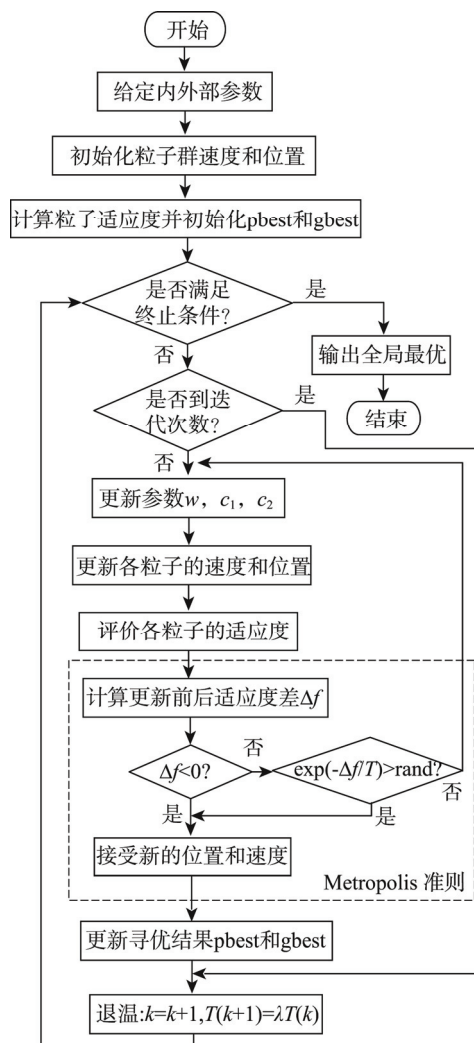


图 5 SA-PSO 混合算法流程

Fig.5 Flow block diagram of SA-PSO algorithm

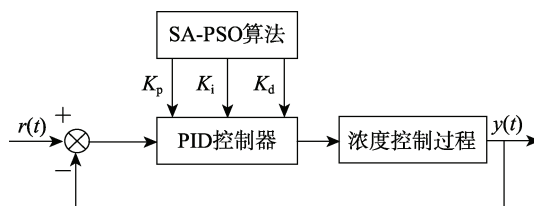


图 6 基于 SA-PSO 的纸浆浓度 PID 优化控制

Fig.6 Schematic diagram of PID's optimization control based on SA-PSO

的积分上限 $t_{lim}=R\Delta t$, $R \in \mathbf{N}^+$, 保证系统响应输出 $y(t_{lim})=y(\infty)$, 得到离散时间数组 $t(z)$, $z=0, 1, 2 \dots R$; 则每一个时间点对应一个偏差 $e(z)$, 只需 Δt 足够小, 式(9)积分可近似为 $f \approx \sum_{z=0}^R t(z) |e(z)| \Delta t$, 且 $t(z)=z\Delta t$ 。

为得到较好的系统性能, 期望算法初期全局搜索强和后期局部搜索强且整体平衡, 对式(7)中惯性权系数 w 按式(10)线性递减, 学习因子 c_1, c_2 按式(11)动态调整。

$$w(n)=w_{\max}-(w_{\max}-w_{\min})(n/M) \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} c_1(n) &= c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min})(n/M) \\ c_2(n) &= (c_{\max} + c_{\min}) - c_1(n) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.2 基于 MATLAB 仿真结果比较

据前文分析,纸浆浓度控制过程的开环传递函数模型如式(3)形式,邹伟等^[16]给出了某纸浆浓度控制过程的简化模型见式(12):

$$G(s)=\frac{3}{2s+1}e^{-3s}$$
 (12)

实验仿真中,算法主要参数设定: $N=40$, $D=3$, $M=1000$, $w_{\max}=0.9$, $w_{\min}=0.4$, $c_{\max}=2.5$, $c_{\min}=0.5$,限定 3 个变量范围均为 $[0.0001,10]$,初温 $T(0)=100\text{ K}$, $\lambda=0.99$, $t_{\text{lim}}=100\text{ s}$, $\Delta t=0.1\text{ s}$ 等。再分别用 Z-N 法、SAA、PSO 的结果对系统进行单位阶跃仿真比较。4 种方式的整定结果和系统性能参数见表 1—2,在有干扰和无干扰下系统的单位阶跃响应曲线见图 7—8。

表 1 不同方法整定结果

Tab.1 The results of different tuning methods

方法	K_p	K_i	K_d	f
Z-N 法	0.225	1.73333	0.45	174.397
SAA	0.2698	3.1126	0.8663	9.2381
PSO	0.1265	1.9481	3.1483	39.0476
SA-PSO	0.2155	3.0000	0.8329	13.2457

表 2 不同方法下系统性能参数

Tab.2 The performance indices of control system with different tuning methods

方法	超调量/%	调节时间/s	上升时间/s	振荡次数/次	干扰调节时间/s
Z-N 法	58.27	64.7	8.9	3.5	60.1
SAA	14.58	22.2	8	1	26.2
PSO	12.20	45.4	16.7	1	48.3
SA-PSO	3.07	22.8	9	0.5	24.9

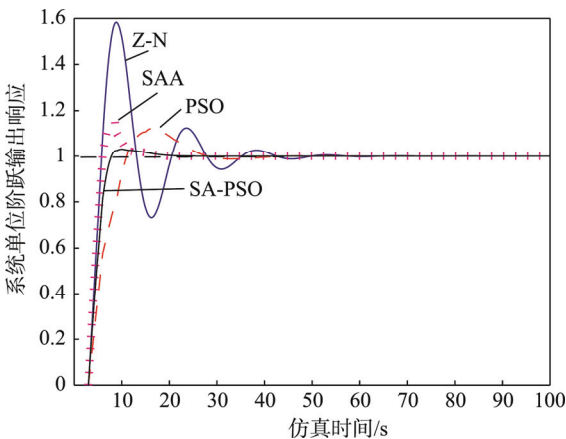


图 7 系统单位阶跃响应曲线

Fig.7 The step response curve of control system

由表 1—2 与图 7—8 可知,基于 SA-PSO 的系统控制效果较单纯的 SAA、PSO、Z-N 法其优越性显著,充分验证将 SAA 与 PSO 结合的有效性,混合算法的确发挥了 SA 与 PSO 各自的优势。实际过程工艺参数受各种干扰或噪声及非线性因素影响,即存在模型失配问题,则现假设模型式(12)中各参数摄动,见式(13)。

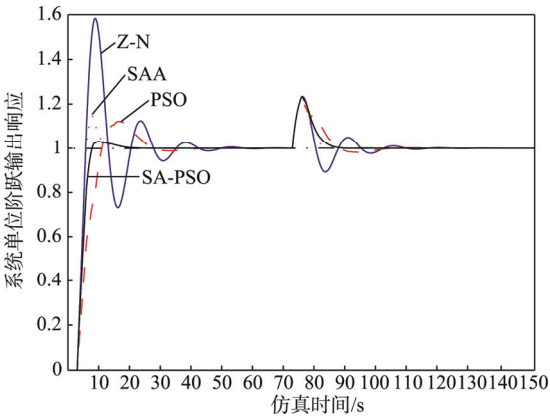


图 8 系统阶跃干扰下的响应曲线

Fig.8 The response curve of control system with step disturbance

$$G(s)=\frac{2.8}{2.3s+1}e^{-3.5s}$$
 (13)

4 种方法下系统单位阶跃加干扰的响应曲线见图 9。由图 9 可知,SA-PSO 混合算法优化的 PID 在模型失配且有较大干扰时,仍能良好地保持系统性能,较另外 3 种方法系统具有更好的鲁棒性且调整干扰更快。

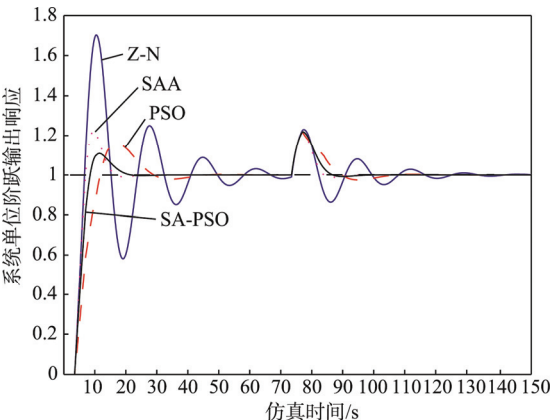


图 9 模型失配及干扰下系统响应曲线

Fig.9 The response curve of control system with unmatched model

3.3 实际控制效果

上述思想方法已试用于河北保定某卫生纸厂的生产线,从现场截取的其中一个浓度控制环节上位机 WinCC 画面反映的浓度历史变化曲线见图 10,由图 10

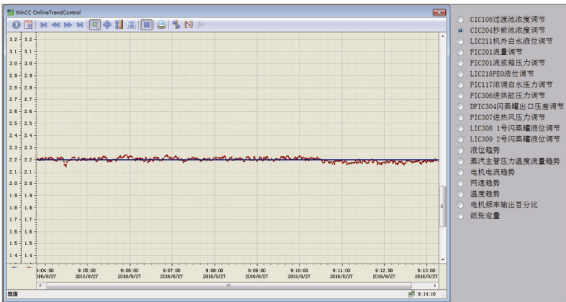


图 10 上位机 WinCC 浓度历史变化曲线

Fig.10 The process curve of pulp concentration in WinCC

可知,现场监测值能很好地在控制误差范围 $\pm 3\%$ 内平稳波动并跟踪设定值,控制效果良好,验证了方法的有效性。

4 结语

针对 PSO 后期收敛性差和 SA 算法跳出局部最优能力强等特点,以 PSO 为主体框架引入 SA 机制,结合成 SA-PSO 混合算法,并应用于纸浆浓度控制系统的 PID 参数优化,与单纯的 SAA、PSO 及 Z-N 法进行仿真比较以及实际应用效果,表明该方法具有更好的综合性能评价指标,使系统过度平稳,超调小,响应速度快,调整较快,抗干扰和鲁棒性更好。说明该方法理论上的有效性和优越性,但 SA-PSO 混合算法还具有较大的改进空间,其长期性应用情况还需工程实践进一步的验证。

参考文献:

- [1] 宁奎伟,李明辉. 基于遗传算法的控制器参数整定及其在温度控制中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 141—145.
NING Kui-wei, LI Ming-hui. Control Parameter Tuning Based on Genetic Algorithm and Its Application in Temperature Control[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 141—145.
- [2] 曹露,熊智新,胡慕伊. 纸浆浓度控制系统的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(6): 176—179.
CAO Lu, XIONG Zhi-xin, HU Mu-yi. Simulation and Research on Pulp Consistency Control System[J]. Computer Simulation, 2012, 29(6): 176—179.
- [3] TAN Wen, LIU Ji-zhen, CHEN Tong-wen, et al. Comparison of Some Well-known PID Tuning Formulas[J]. Computers and Chemical Engineering, 2006, 30(9): 1416—1423.
- [4] 黄亚南,张爱娟,胡慕伊. 基于单神经元 PSD 的纸浆浓度控制算法研究[J]. 中国造纸, 2016, 35(5): 46—50.
HUANG Ya-nan, ZHANG Ai-juan, HU Mu-yi. Pulp Consistency Control Algorithm Based on Single Neuron Adaptive PSD[J]. China Pulp & Paper, 2016, 35(5): 46—50.
- [5] 吴新生. 纸浆浓度的模糊神经网络自适应 PID 控制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 2969—2971.
WU Xin-sheng. Fuzzy Neural Network Adaptive PID Control of Pulp Consistency[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(11): 2969—2971.
- [6] 葛升民,童树鸿,周斌. 纸浆浓度控制系统的设计[J]. 中国造纸, 2002, 21(3): 50—52.
GE Sheng-min, TONG Shu-hong, ZHOU Bin. Design of Pulp Consistency Control System[J]. China Pulp & Paper, 2002, 21(3): 50—52.
- [7] 陈华根,吴健生,王家林,等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 802—805.
CHEN Hua-gen, WU Jian-sheng, WANG Jia-lin, et al. Mechanism Study of Simulated Annealing Algorithm[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(6): 802—805.
- [8] 王华秋,曹长修. 基于模拟退火的并行粒子群优化研究[J]. 控制与决策, 2005, 25(5): 500—504.
WANG Hua-qiu, CAO Chang-xiu. Parallel Particle Swarm Optimization Based on Simulated Annealing[J]. Control and Decision, 2005, 25(5): 500—504.
- [9] 王丽芳,郭晓东,曾建潮. 基于 Metropolis 准则的微粒群算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3903—3906.
WANG Li-fang, GUO Xiao-dong, ZENG Jian-chao. Modified Particle Swarm Optimization Based on Metropolis Rule[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3903—3906.
- [10] 刘明,华亮. 基于 PSO 算法的 PID 控制器参数整定[J]. 控制工程, 2016, 23(1): 64—68.
LIU Ming, HUA Liang. Tuning of PID Controller Parameters Based on PSO Algorithm[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(1): 64—68.
- [11] SUNGTHONG A, ASSAWINCHACHOTE W. Particle Swarm Optimization Based Optimal PID Parameters for Air Heater Temperature Control System[J]. Procedia Computer Science, 2016, 86: 108—111.
- [12] 高哲,廖晓钟. 基于平均速度的混合自适应粒子群算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(1): 152—160.
GAO Zhe, LIAO Xiao-zhong. Hybrid Adaptive Particle Swarm Optimization Based on Average Velocity[J]. Control and Decision, 2012, 27(1): 152—160.
- [13] 李毅,孙正兴,陈松乐,等. 基于退火粒子群优化的单目视频人体姿态分析方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(5): 732—741.
LI Yi, SUN Zheng-xing, CHEN Song-le, et al. 3D Human Pose Analysis from Monocular Video by Simulated Annealed Particle Swarm Optimization[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(5): 732—741.
- [14] 刘洪波,王秀坤,谭国真. 粒子群优化算法的收敛性分析及其混沌改进算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 636—645.
LIU Hong-bo, WANG Xiu-kun, TAN Guo-zhen. Convergence Analysis of Particle Swarm Optimization and Its Improved Algorithm Based on Chaos[J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 636—645.
- [15] SAHIB M A, AHMED B S. A New Multiobjective Performance Criterion Used in PID Tuning Optimization Algorithms[J]. Journal of Advanced Research, 2015, 115(1): 125—134.
- [16] 邹伟,孙瑜,周海君. 纸浆浓度的仿人智能 PID 控制[J]. 中国造纸, 2005, 24(8): 44—46.
ZOU Wei, SUN Yu, ZHOU Hai-jun. Simulated Human Intelligence PID Control for Pulp Consistency[J]. China Pulp & Paper, 2005, 24(8): 44—46.