

基于多目标优化 PID 的纸浆浓度控制系统

李禄源¹, 毛伟伟²

(1.许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000; 2.洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: **目的** 针对纸浆浓度 PID 控制系统在时滞性、稳定性、耦合性方面的不足, 提出一种基于多目标优化的纸浆浓度 PID 控制方法。**方法** 对纸浆生产工艺进行分析, 结合纸浆浓度 PID 控制系统, 设定多属性的决策变量, 建立对应的目标函数和约束条件; 从质量、产量、成本、环境等 4 个方面对纸浆浓度 PID 控制过程进行多目标优化, 构建基于多目标优化的纸浆浓度 PID 控制模型; 采用改进量子粒子群算法对多目标优化模型进行求解, 获得 Pareto 最优纸浆浓度控制方案; 将建模方法、优化算法、优选方法进行耦合, 从而形成“建模-求解-优选”全过程的纸浆浓度控制方法。**结果** 通过对纸浆浓度控制优化前后的决策变量进行比较分析可知, 多目标优化 PID 控制方法在评价指标方面满足了质优、高产、低耗的多目标优化的可控性要求; 相较于传统 PID 控制方法, IPSO-PID 控制方法的响应速度更快, 具有更好的鲁棒性; 在 PID 参数优化方面, 文中的优化模型整定控制参数在 0.05 s 内达到稳态阶段, 稳态误差更低, 具有更好的稳定性。**结论** 在保证系统鲁棒性的同时, 基于多目标优化算法的纸浆浓度 PID 控制系统可实现对纸浆浓度的精确性和稳定性控制, 更好地满足实际工业生产的要求, 确保纸张质量的品质。

关键词: 纸浆浓度控制; 多目标优化; PID; 量子粒子群算法

中图分类号: TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)21-0247-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.21.034

PID Pulp Concentration Control System Based on Multi-Objective Optimization

LI Lu-yuan¹, MAO Wei-wei²

(1.Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China; 2.Luoyang Institute Science and Technology, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a PID pulp concentration control method based on multi-objective optimization for the shortcomings of pulp concentration PID control system in time lag, stability and coupling. The pulp production process was analyzed. Combined with the pulp concentration PID control system, multi-attribute decision variables were set, and the corresponding objective functions and constraints were established. The multi-objective optimization was carried out to the pulp concentration PID control process from quality, yield, cost and environment and the pulp concentration PID control model was built based on multi-objective optimization. The model was solved by improved quantum particle swarm algorithm to obtain the Pareto optimal pulp concentration control scheme. The modeling method, optimization algorithm and selection method were coupled to form the whole process of "modeling-solving-selection" pulp concentration control method. Through the comparison and analysis on decision variables before and after pulp concen-

收稿日期: 2021-04-24

基金项目: 河南省重点科技攻关计划 (182102110099)

作者简介: 李禄源 (1983—), 男, 许昌电气职业学院讲师, 主要研究方向为系统设计、算法优化。

通信作者: 毛伟伟 (1981—), 男, 硕士, 洛阳理工学院讲师, 主要研究方向为图形图像、计算机应用技术。

tration control optimization, the multi-objective optimized PID control method met the controllability requirements of multi-objective optimization with good quality, high yield and low consumption in terms of evaluation indexes. IPSO-PID control method had faster response speed and better robustness compared with the traditional PID control method. In terms of PID parameter optimization, the optimization model set the control parameters in the steady-state stage within 0.05 seconds, with lower steady-state error and better stability. While ensuring the robustness of the system, the PID pulp concentration control system based on multi-objective optimization algorithm can achieve accurate and stable control of pulp concentration, meet the requirements of actual industrial production better, and ensure the quality of paper.

KEY WORDS: pulp concentration control; multi-objective optimization; PID; quantum particle swarm algorithm

在造纸工业生产过程中,控制纸浆浓度的稳定是保障纸张质量的重要因素。PID 控制系统具有结构简单、鲁棒性强等特点,广泛应用于纸浆浓度的工业控制环节。在实际的造纸工业生产过程中,由于被控对象大多具有时变性、非线性和大时滞等特点^[1],而常规 PID 控制在参数调整方面存在消耗时间较长、能量消耗较大等不足,难以建立精确的纸浆浓度控制数学模型,因此很难对纸浆浓度工业控制中的参数进行实时调整,无法满足实际生产控制要求^[2]。近年来,国内外相关学者提出了诸多改进的纸浆浓度 PID 控制方法。陈银环^[3]提出了基于 BP 神经网络 PID 纸浆浓度自适应控制方法,该算法提高了非线性系统的自适应控制能力,但计算量复杂、对系统响应要求较高,难以达到实际生产控制要求。郑飞等^[4]采用改进量子粒子群仿生算法实现了对常规 PID 控制器参数的实时性调整,该系统具有响应速度快、鲁棒性高等特性,但该算法对复杂非线性系统的控制能力较差。吴新生^[5]设计了纸浆浓度的模糊神经网络 PID 控制系统,该系统的抗干扰性和稳定性等控制性能优于常规 PID 控制器,但也存在算法复杂度高、计算量大等缺陷和不足。

针对现有纸浆浓度 PID 控制系统存在的不足,以及 PID 控制过程中受蒸汽压力、成浆质量、水分含量、成浆浓度等多种环境因素限制^[6],文中以纸浆浓度 PID 控制系统为研究对象,以多目标优化问题求解为设计思路,设计一种基于多目标优化和多属性决策的纸浆浓度 PID 控制模型。

1 相关知识

1.1 传统 PID 控制

纸浆浓度反馈控制系统主要由浓度传感器、流量传感器、调节阀、控制器、调浆箱、送浆泵等部件组成^[7],其结构见图 1。浆池中的绝干浆通过送浆泵被输送到调浆箱中,浓度传感器将绝干浆浓度值传至控制器,并完成与目标浓度值的比较,根据比较结果再由控制器对稀释水调节阀进行控制,将稀释水输送到浆池,达到对纸浆浓度的反馈控制^[8]。

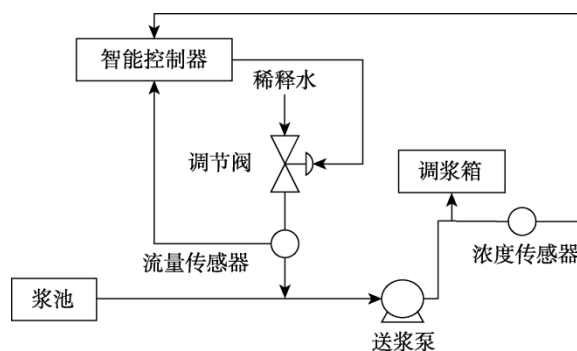


图 1 纸浆浓度反馈控制系统

Fig.1 Pulp concentration feedback control system

采用传感器进行 PID 反馈控制的纸浆控制系统原理见图 2,主要包括 PID 控制器和被控对象 2 部分,通过对比例系数、积分系数和微分系数 3 类控制参数进行整定,实现了对纸浆浓度的实时控制。

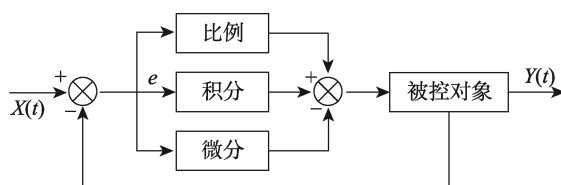


图 2 传统 PID 控制系统原理

Fig.2 Principle of traditional PID control system

PID 控制的数学模型见式 (1)。

$$x(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: K_p , K_i , K_d 分别为 PID 控制器中的比例系数、积分系数和微分系数; $e(t)$ 为不同时间段控制量的差值; t 为控制时间。

PID 控制过程中利用式 (2) 完成 PID 控制算法的离散化处理:

$$\Delta U_n = K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (2)$$

式中: n 为采样序号; e_n 为第 n 次采样的偏差值; U_n 为第 n 次采样的控制输出量。

由于纸浆浓度控制对精度控制和时效性要求较高,控制参数无法根据环境变化实时进行自适应调

整, 导致常规 PID 很难达到理想化的控制效果, 难以满足造纸生产控制的实际要求^[9]。此外, 常规 PID 控制将纸浆浓度误差 e 和纸浆浓度误差变化 e_c 作为输入变量, PID 参数整定方法有经验法、衰减曲线法、响应曲线法等。由于传感器采集过程需要时间, 因此很难克服 PID 在纸浆浓度控制过程中由非线性、时变性以及时滞性所带来的问题。

1.2 多目标优化

一个典型多目标优化问题 (multi-objective optimization, MOP) 的求解主要由 m 个目标函数、 n 个决策变量、 r 个不等式约束条件以及 t 个等式约束条件组成^[10], 其数学表达式见式 (3)。

$$\begin{aligned} \text{Min: } f(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \\ \text{s.t.: } g_i(x) &\leq 0 \quad i=1, \dots, r \\ h_j(x) &= 0 \quad j=1, \dots, t \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为 m 维目标函数向量, x 为 n 维决策变量, $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]$; $g_i(x)$ 为第 i 个不等式约束条件; $h_j(x)$ 为第 j 个约束条件, 求解最小化 MOP 必须同时满足上述 2 类约束条件, 从而得到决策空间 $\mathfrak{R}$ ^[11]。

对于一个多目标优化问题, 由于多维目标之间存在冲突, MOP 通常不存在绝对的最优解, Pareto 解有很多, 需要在可行解中得到 Pareto 解集, 再根据不同的情况、环境、条件、目标等要求, 求解出 Pareto 意义下的一组折中解^[12]。设 x, x' 分别是 2 个可行解, 若满足式 (4), 称 x 支配 x' , 记作 $x \prec x'$, 得到的目标函数 $f(x)$ 则为一组 Pareto 最优解, 再利用迭代关系, 得到所有 Pareto 最优解构成的集合, 记为 $P_S = \{f_i(x)\}$, 最终通过目标函数映射得到所有目标求解空间, 称为 Pateto 前沿 (Pareto Front, PF)^[13]。

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, f_i(x) \leq f_i(x') \wedge f(x) \neq f_i(x') \quad (4)$$

2 多目标优化 PID 控制模型构建与求解

2.1 目标函数的确定

纸浆浓度 PID 控制的多目标优化问题不仅要以满足纸浆质量为主要目标, 同时还要考虑纸浆产量、生产成本、环境污染等多目标要求。根据纸浆生产工艺得到, 影响纸浆浓度控制的主要技术指标包括纸浆浓度传感器动态特性、阀门动态特性以及稀释水与纸浆混合过程动态特性。基于此, 文中选取进浆浓度 x_1 、进浆流量 x_2 、稀释水用量 x_3 和蒸汽热能用量 x_4 作为决策变量, 目标函数分别设定为纸浆质量 f_1 、纸浆产量 f_2 、生产成本 f_3 。

2.1.1 纸浆质量目标函数

纸浆质量的好坏取决于 2 个重要的指标参数, 即黑液波美度和残碱浓度含量, 通过定义质量偏差函数, 得到纸浆质量的目标函数 f_1 , 计算见式 (5)。

$$f_1 = \min(\beta \cdot (K_1^* - K_1)^2 + (1 - \beta) \cdot (K_2^* - K_2)^2) \quad (5)$$

式中: K_1, K_2 分别为黑液波美度和残碱浓度含量的实测值; K_1^*, K_2^* 分别为黑液波美度和残碱浓度含量的期望值; β 为上述 2 个质量指标的权重系数, 其中, 实际工业生产过程中, 设定 $\beta = 0.5$ 。

2.1.2 纸浆产量目标函数

生产产量的高低取决于进浆浓度 x_1 和进浆流量 x_2 , 产量的目标函数可定义为: $f_2 = \max(x_1 \cdot x_2)$, 通过计算产量偏差函数, 将目标函数极大值问题转换为求解极小值问题来处理, 从而得到纸浆产量偏差目标函数 f_2 , 计算见式 (6)。

$$f_2 = \min(\max(x_1) \cdot \max(x_2) - x_1 \cdot x_2) \quad (6)$$

式中: $\max(x_1), \max(x_2)$ 分别为进浆浓度和进浆流量的最大值。

2.1.3 生产成本目标函数

生产成本消耗主要包括稀释水用量 x_3 、蒸汽热能用量 x_4 , 得到生产成本目标函数为 f_3 , 见式 (7)。

$$f_3 = \min(p_1 x_3 + p_2 x_4) \quad (7)$$

式中: p_1, p_2 分别为稀释水和蒸汽价格指数。

根据上述 3 类目标函数, 纸浆浓度控制的多目标优化问题可表征为:

$$\min: f(x) = \begin{cases} f_1 = \min(\beta \cdot (K_1^* - K_1)^2 + (1 - \beta) \cdot (K_2^* - K_2)^2) \\ f_2 = \min(\max(x_1) \cdot \max(x_2) - x_1 \cdot x_2) \\ f_3 = \min(p_1 x_3 + p_2 x_4) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 约束条件的建立

在实际造纸工业生产中纸浆浓度会受到很多因素限制, 如成浆浓度波动、进浆流量、成浆含碱量、稀释水用量、蒸汽压力等。上述影响因素则构成了多目标优化问题的约束条件, 约束条件见式 (9)。

$$\text{条件} \begin{cases} \min(X_1) \leq x_1 \leq \max(X_1) \\ \min(X_2) \leq x_2 \leq \max(X_2) \\ \min(X_3) \leq x_3 \leq \max(X_3) \\ \min(X_4) \leq x_4 \leq \max(X_4) \end{cases} \quad (9)$$

2.3 优化模型的构建

基于多目标优化的纸浆浓度控制需要对多个参数进行解耦控制, 解耦的本质是一种多变量的过程控制, 因此, 多目标优化模型的构建是对多个目标进行优化求解, 最终得到一组最佳的决策变量^[14—15]。获取最优解的过程不仅要确保纸张质量达到生产工艺要求, 还要满足纸浆质量优、环境污染小、生产成本低等多目标要求。文中构建出基于多目标优化的 PID 控制模型, 其系统结构见图 3。

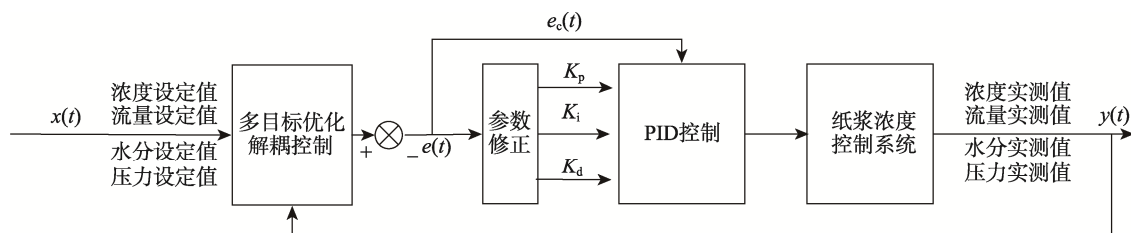


图 3 基于多目标优化的纸浆浓度 PID 控制结构

Fig.3 PID control structure of pulp concentration based on multi-objective optimization

分析图 3 可知,基于多目标优化的 PID 控制系统主要由多目标优化解耦控制模块、参数修正模块、PID 控制器控制模块等三大功能模块组成。其中,多目标优化解耦控制模块将 4 个决策变量的设定值作为输入变量,利用多目标优化算法,完成最优决策变量的求解过程;将多目标优化解耦控制模块的输出变量通过参数修正模块进行整定,得到 PID 控制模块的输入变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$; PID 控制模块将纸浆浓度偏差 $e(t)$ 和纸浆浓度偏差变化量 $e_c(t)$ 作为输入变量,并将决策变量的实测值作为输出变量,实时反馈到多目标优化解耦控制模块,从而实现在线实时调节 PID 控制器的参数。

2.4 优化模型的求解

根据所建立的多目标优化 PID 控制模型,文中采用了基于改进量子粒子群算法^[16]优化纸浆浓度 PID 控制系统(以下简称 IPSO-PID 算法),完成对 Pareto 最优解的计算和获取。IPSO-PID 算法的总体思路:首先,初始化粒子的位置、速度和评价适应值;其次,根据 Pareto 支配原则,计算得到备选方案 Archive 集合(非劣解集),并选出全局粒子引导者;然后,根据全局粒子引导者更新粒子的速度、位置、适应值和 Pareto 支配关系,并根据评价结果更新 Archive 集合,逐步淘汰劣等方案;最后,如果满足目标设定值或者达到循环次数,则结束,否则重复上述步骤,直到获取最优解决方案,IPSO-PID 算法的求解流程见图 4。

IPSO-PID 算法执行步骤如下所述。

1) 对粒子群 X 进行参数初始化,包括粒子数量 N 和变量数量 D ,其中 $X = X_{N \times D} = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$,每个粒子表示一个有效解,得到备选方案 Archive 非劣解集。

2) 对粒子的位置和速度进行适应度评价,其中,粒子位置 $X_i = X_{i \times D}$,粒子速度 $v_i = v_{i \times D}$,找到当前个体最优 $P_i = P_{i \times D}$ 和群体最优 $G = G_{i \times D}$ 。

3) 判断循环次数是否达到指定迭代次数,若满足则跳转到步骤 5,否则执行步骤 4。

4) 更新粒子位置和速度,计算分别见式(10)和(11)。

$$v_i^{n+1} = wv_i^n + c_1r_1(P_i^n - X_i^n) + c_2r_2(G^n - X_i^n) \quad (10)$$

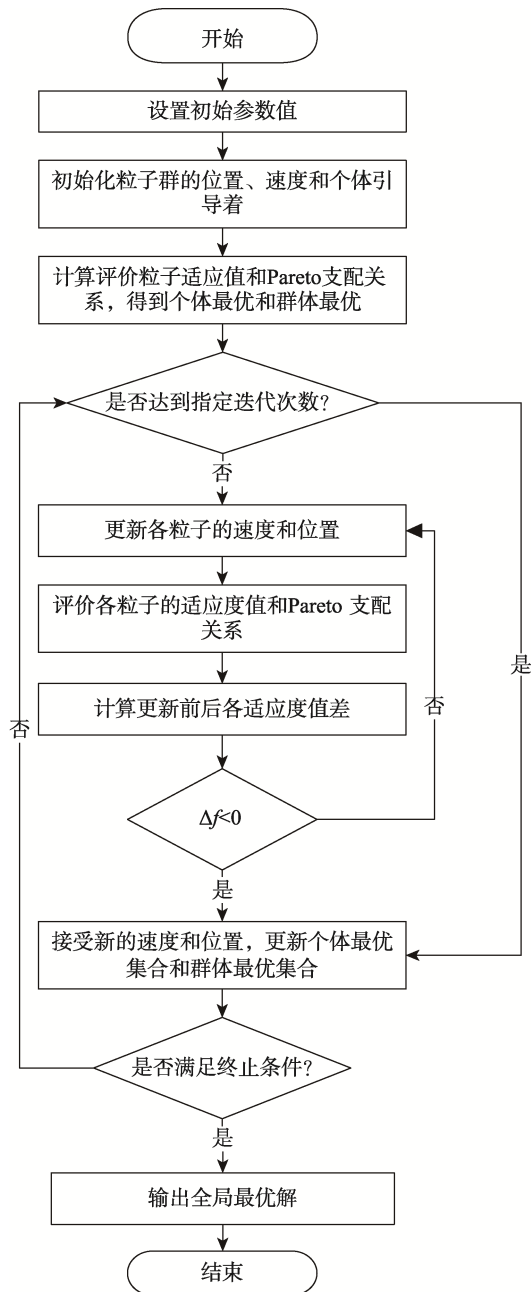


图 4 改进量子粒子群优化算法流程

Fig.4 Flow chart of improved quantum particle swarm optimization algorithm

$$X_i^{n+1} = X_i^n + v_i^{n+1} \quad (11)$$

式中: n 为第 n 次迭代; w 为惯性权系数; c_1, c_2

为学习因子； r_1, r_2 分别为 2 个独立的随机数，且 $r_1, r_2 \in [0,1]$ 。

5) 评价更新后各粒子的适应度值，比较更新前后 2 个位置所引起的适应度差 Δf ，根据 Metropolis 准则，判断是否接受新的位置和速度，若不接受，则跳转到步骤 4。

6) 更新个体最优集合 P 和群体最优集合 G 。

7) 判断终止条件，若满足目标设定值或者达到循环次数，则结束，否则跳转步骤 3，直到获取最优解决方案。

3 实验结果与分析

3.1 优化结果比较

以纸浆质量优、纸浆产量高、生产成本低三方面为目标，对纸浆浓度控制过程进行多目标优化，将黑液波美度、残碱含量和出浆量作为纸浆浓度控制的 3 个评价指标，同时将进浆浓度、进浆流量、稀释水量以及蒸汽热能用量作为决策变量，根据 IPSO-PID 求解算法对纸浆浓度控制优化前后结果进行比较，见表 1。

其中，优化 1 参数设置： $N=50, D=3, w=0.5, c_1=2.5, c_2=0.5, r_1=0.7, r_2=0.4$ ；优化 2 参数设置： $N=50, D=3, w=0.4, c_1=2.7, c_2=0.3, r_1=0.2, r_2=0.8$ 。

从表 1 的优化结果分析可知，优化后的残碱含量低于优化前含量，黑液波美度有一定的提高。由此可知，采用多目标优化方法对纸浆浓度控制可以有效平衡纸浆残碱含量和波美度之间的矛盾。另外，对纸浆浓度控制优化后，不仅使得纸浆出浆量得到提升，同时进浆浓度、进浆流量也有增加，耗水量和蒸汽压力用量则分别降低了 18.6% 和 6.7%，满足质优、高产、低耗的多目标优化控制要求。

3.2 PID 控制性能比较

以生产定量为 70 g/m^2 的纸浆为例，采用纸浆浓度控制系统传递函数为纸浆质量评价模型，见式 (12)。

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

使用 Matlab 对传统量子粒子群算法优化的 PID 控制 (PSO-PID)、改进的量子粒子群算法优化的 PID 控制 (IPSO-PID) 以及常规 PID 控制进行仿真对比分析见图 5。IPSO-PID 和常规 PID 的单位阶跃响应曲线见图 5a，3 种控制方法的纸浆质量分数见图 5b。由图 5 可知，文中所提的 IPSO-PID 控制方法比 PSO-PID 控制方法在上升时间、稳态误差、性能指标等方面均有明显的提升，与常规 PID 控制方法相比，IPSO-PID 控制方法响应速度更快，具有更好的鲁棒性和稳定性。

表 1 纸浆浓度优化控制结果
Tab.1 Optimal control results of pulp concentration

编号	决策变量				评价指标		
	进浆质量浓度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	进浆流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	稀释水用量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	蒸汽热能用量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	黑液波美度	残碱质量浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	出浆量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)
优化前	3.5	144.5	47.246	43.574	6.4525	1.587	308.4
优化 1	3.7	175.9	38.472	41.953	8.5482	1.475	397.5
优化 2	3.7	180.5	37.521	40.652	8.5247	1.352	405.2

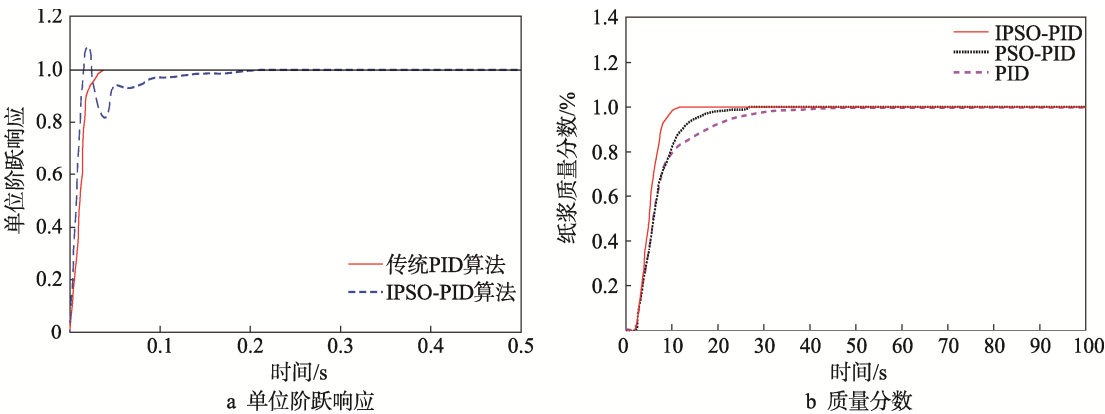


图 5 PID 控制进行仿真对比
Fig.5 Simulation and comparison by PID control

3.3 PID 参数优化比较

纸浆浓度 PID 控制器经过多目标优化控制模型进行优化后, 3 个 PID 控制参数 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的变化曲线见图 6。由图 6 可知, 当纸浆浓度实测值与预设值不一致, 则多目标优化解耦控制模块和参数修正模块开始对 PID 的 3 个参数进行调整, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 参数值可以在很短时间内达到稳态阶段。由此可知, 多目标优化 PID 控制模型可对 PID 控制器的输入参数进行自适应整定, 从而使得纸浆浓度 PID 控制具有较高的响应度和可控制度。

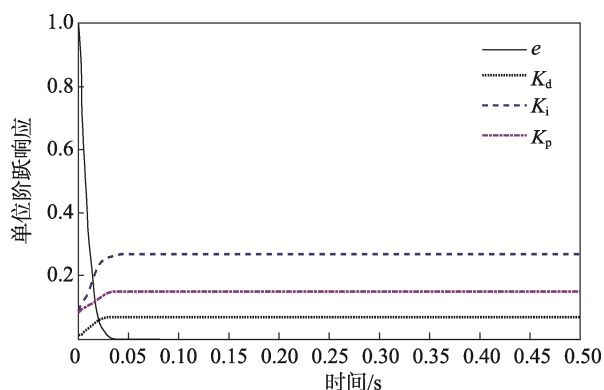


图 6 PID 参数变化曲线
Fig.6 Variation curve of PID parameter

4 结语

纸浆浓度控制是评价造纸质量的重要指标, 对纸浆生产工艺进行分析的基础上, 考虑纸浆浓度控制所满足的多目标要求, 以及所受到的多重动态因素影响, 文中设计了一种基于多目标优化 PID 的纸浆浓度控制系统, 通过构建多目标优化解耦模型实现对常规 PID 控制的比例、积分、微分参数进行优化调整, 避免人为因素干扰所导致的控制精度不高的缺陷, 提高了 PID 控制过程的稳定性和可靠性。实验仿真结果表明, 该方法具有系统耦合性高、鲁棒性强和稳定精度高的特点, 满足了多目标要求和多属性决策下的实际生产需求, 在实际造纸生产中具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 单文娟, 汤伟, 王孟效. 神经网络分数阶 PID 控制器在纸浆浓度控制中的应用[J]. 中国造纸学报, 2016, 31(4): 44—48.
SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao. Application of Fractional Order PID Controller Based on Neural Network to Pulp Consistency Control System[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2016, 31(4): 44—48.
- [2] 欧艳华. 基于神经网络的自适应 PID 控制器设计[J]. 机械设计与制造, 2014, 6(3): 263—265.
OU Yan-hua. The Design of Adaptive PID Controller Based on Neural Network[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 6(3): 263—265.
- [3] 陈银环. 基于 BP 神经网络 PID 的纸浆浓度自适应控制[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 146—150.
CHEN Yin-huan. Adaptive Control of Pulp Concentration Based on BP Neural Network PID[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 146—150.
- [4] 郑飞, 汤兵勇. 基于改进量子粒子群算法的纸浆浓度控制系统[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 196—201.
ZHENG Fei, TANG Bing-yong. Pulp Concentration Control System Based on Improved Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 196—201.
- [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] 单文娟, 汤伟, 侯顺利, 等. 纸浆洗涤过程建模及多目标优化[J]. 中华纸业, 2011, 32(10): 14—18.
SHAN Wen-juan, TANG Wei, HOU Shun-li, et al. Control of Pulp Washing Process Based on Neural Network[J]. China Pulp & Paper, 2011, 32(10): 14—18.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 胡亚南, 宁奎伟, 赵锦文. 基于变论域模糊 PID 的纸浆浓度控制系统研究[J]. 中国造纸, 2019, 38(1): 44—49.
HU Ya-nan, NING Kui-wei, ZHAO Jin-wen. Pulp Consistency Control System Based on Variable Universe Fuzzy PID[J]. China Pulp & Paper, 2019, 38(1): 44—49.
- [10] 张建侠, 马义中, 朱连燕, 等. 基于仿真试验和 Kriging 模型的多目标优化问题全局优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(10): 2136—2145.
ZHANG Jian-xia, MA Yi-zhong, ZHU Lian-yan, et al. Global Optimization of Multi-Objective Optimization Problems Based on Simulation Trials and Kriging

- Models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(10): 2136—2145.
- [11] 张召, 张伟, 廖卫红, 等. 基于生态流量区间的多目标水库生态调度模型及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 96—101.
- ZHANG Zhao, ZHANG Wei, LIAO Wei-hong, et al. Model of Multipurpose Reservoir Ecological Operation Based on Ecological Flow Range and Its Application[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 96—101.
- [12] 张磊, 毕晓君, 王艳娇. 基于重新匹配策略的约束多目标分解优化算法[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1032—1040.
- ZHANG Lei, BI Xiao-jun, WANG Yan-jiao. The Constrained Multi-Objective Decomposition Optimization Algorithm Based on Rematching Strategy[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1032—1040.
- [13] 许伟伟, 梁静, 岳彩通, 等. 多模态多目标差分进化算法求解非线性方程组[J]. 计算应用研究, 2019, 36(5): 1—7.
- XU Wei-wei, LIANG Jing, YUE Cai-tong, et al. Multi-Modal Multi-Objective Differential Evolution Algorithm for Solving Nonlinear Equations[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(5): 1—7.
- [14] 肖俊明, 周谦, 瞿博阳, 等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016(2): 1—9.
- XIAO Jun-ming, ZHOU Qian, QU Bo-yang, et al. Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Its Application in Electric Power Environment Economic Dispatch[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016(2): 1—9.
- [15] 李星峰, 尹湘云, 殷国富. 基于 CFD 和多目标算法的离心叶轮参数优化[J]. 流体机械, 2019, 47(3): 31—36.
- LI Xing-feng, YIN Xiang-yun, YIN Guo-fu. Parameter Optimization of Centrifugal Compressor Impeller Based on CFD and Multi-Objective Algorithm[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(3): 31—36.
- [16] 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 Neu-Ron Adaptive PSD[J]. China Pulp & Paper, 2016, 35(5): 46—50.