

# 基于扰动抑制的差分进化算法的纸浆浓度控制系统

陶峰, 张伟, 王亚刚

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 为了解决传统单 PID 控制优化算法仅关注跟踪性能, 无法满足在纸浆浓度控制系统等工业生产环节中控制品质和成品良率的需求。**方法** 将 PID 控制系统离散化以计算在高斯扰动下的输出方差作为扰动抑制的依据, 并结合 ITAE 指标通过差分进化算法优化 PID 性能。**结果** 仿真表明, 该整定方法可以通过权值选取优化的偏好, 自由调节 PID 控制器的性能表现, 对比基于 Z-N 法的 PID 控制和基于 PSO 算法优化的 PID 控制, 基于扰动抑制差分进化算法的 PID 控制的 ITAE 指标为 14.3495, 输出方差为 31.8530, 均优于其他 2 种算法。**结论** 基于扰动抑制的差分进化算法可以通过用户自定义权重来协调纸浆浓度的输出方差和跟踪性能, 从更实际的角度整定纸浆浓度控制系统的 PID 控制器参数, 使得控制系统的性能指标满足工业生产要求。

**关键词:** 纸浆浓度; 差分进化算法; ITAE; PID; 扰动抑制

**中图分类号:** TB486<sup>+</sup>.3; TP273<sup>+</sup>.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0185-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.026

## Pulp Concentration Control System Based on Differential Evolution Algorithm under Disturbance Rejection

TAO Feng, ZHANG Wei, WANG Ya-gang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to solve the problem that the traditional single PID control optimization algorithm only focuses on response performance, so as to meet the demand on quality and yield control in the industrial production links such as pulp concentration control system. The algorithm calculated disturbance rejection by discretizing PID control system, and optimized PID performance by differential evolution algorithm combined with ITAE index. Simulation results showed that the tuning method can freely adjust the performance of PID controller by selecting the optimal preference through the weight. Compared with PID control based on Z-N method and PID control based on PSO algorithm, the ITAE index of PID control based on disturbance rejection differential evolution algorithm was 14.3495, and the output variance was 31.8530, both were better than those of the other two algorithms. The differential evolution algorithm based on disturbance rejection can coordinate the output variance and tracking performance of pulp concentration by user-defined weight, and adjust the parameters of PID controller of pulp concentration control system from a more practical point of view, so that the performance index of control system can meet the requirements of industrial production.

**KEY WORDS:** pulp consistency; differential evolution algorithm; ITAE; PID; disturbance rejection

收稿日期: 2019-10-27

基金项目: 国家自然科学基金 (11502145, 61074087, 61703277); 上海市航天基金 (SAST2018-022)

作者简介: 陶峰 (1994—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻控制回路性能评估。

通信作者: 张伟 (1981—), 男, 上海理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为过程控制、最优控制等。

纸浆浓度控制在纸张生产中尤为重要,浓度控制的品质决定纸张的质地、良品率,生产工艺的稳定性,并直接对生产的经济效益有明显影响。由于纸浆浓度控制系统具有大时滞过程,且在生产中浓度、流量等参数被采样时存在一定误差,所以纸浆浓度控制系统往往会出现建模不精确、扰动多等现象。在实际生产过程中,90%的工业控制回路均由PID控制<sup>[1-2]</sup>,其成熟的设计方案足以满足纸浆浓度控制系统的需求。

PID控制的优点在于结构简单,易于分析整定,且鲁棒性强,在被控对象为时滞对象时仍具有良好的控制效果。在针对纸浆浓度的PID控制算法中,主要通过几种常用的方法确定PID参数:通过启发式算法寻优ITAE等性能指标,得到最佳的PID控制器参数<sup>[3-4]</sup>,实现简单,性能可靠;通过神经网络与PID控制器相结合,使PID控制器能够对时变,非线性的环节有较强的适应能力<sup>[5-9]</sup>,但没有考虑扰动的对神经网络训练的影响;通过专家系统或模糊控制等方法整定PID参数<sup>[10-12]</sup>,能够有较好的性能表现,但需要先验知识等问题。

一般通过启发式算法整定PID参数仅关注系统的跟踪性能,却忽视了扰动的存在,这在实际的工业纸张生产环节中影响良品率和成品质量,为满足纸浆浓度控制的生产品质要求,文中提出一种基于PID输出方差作为扰动抑制的依据,并结合ITAE指标作为优化目标函数,使用差分进化算法优化PID参数,用来满足纸浆浓度控制系统的跟踪性能和扰动抑制,并通过仿真对比优化的PID参数结果,验证算法的可行性和有效性。

### 1 纸浆浓度控制系统

纸浆浓度控制回路实际模型见图1。该控制系统主要由控制器、浆池、调节阀、冲浆泵、传感器、配浆箱等组成。冲浆泵将纸浆送去配浆箱的过程中安装有浓度传感器,PID控制器通过纸浆浓度传感器和水流量传感器的返回结果,通过一定的控制律控制调节阀的开度,使得适当的水混合浆池的纸浆后调节至设定值浓度,再通过冲浆泵送至配浆箱,再一次通过

纸浆浓度传感器返回当前浓度,由此构成反馈回路。该反馈控制回路能够不断地纠正浓度的偏差,使得纸浆能够维持在设定好的浓度。良好的反馈控制系统能够保证纸张生产工艺的稳定,使得生产出的纸张高质量高产,提高生产的经济效益。纸浆浓度控制系统的反馈模型见图2。

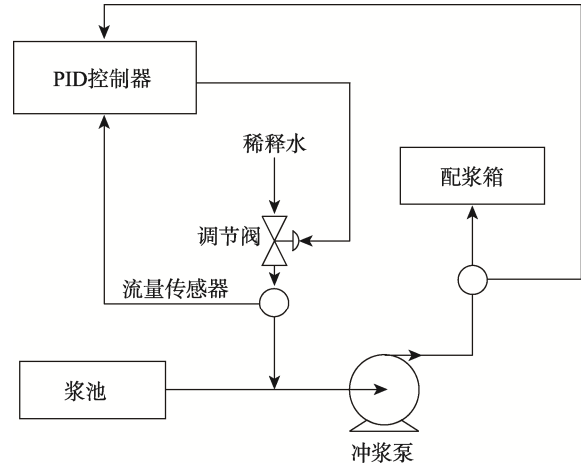


图1 纸浆浓度控制系统  
Fig.1 Pulp concentration control system

在纸浆浓度反馈控制系统模型中,不含时滞的过程模型 $G(s)$ 由3个一阶惯性环节组成,其中 $T_1$ 表示为调节阀的动作特性, $T_2$ 表示为稀释水与纸浆混合的过程特性, $T_3$ 表示为浓度变送器的动态变化特性,具体的 $G(s)$ 表达式为:

$$G(s) = \frac{1}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} \tag{1}$$

图2中 $e^{-Ls}$ 为系统延迟,代表调节阀的调节纸浆浓度作用被浓度传感器检测到的延迟时间; $k$ 为过程的增益; $D_1$ 与 $D_2$ 为负载扰动和测量的扰动; $R(t)$ 为设定值。

为便于优化处理,实际 $T_1, T_2$ 小于 $T_3$ ,则 $G(s)$ 模型可以被简化成 $\frac{1}{(T_3s+1)}$ 来处理,则确切的过程模型可以表示为一阶惯性时滞环节,其数学模型<sup>[13]</sup>为:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{(T_3s+1)} e^{-Ls} \tag{2}$$

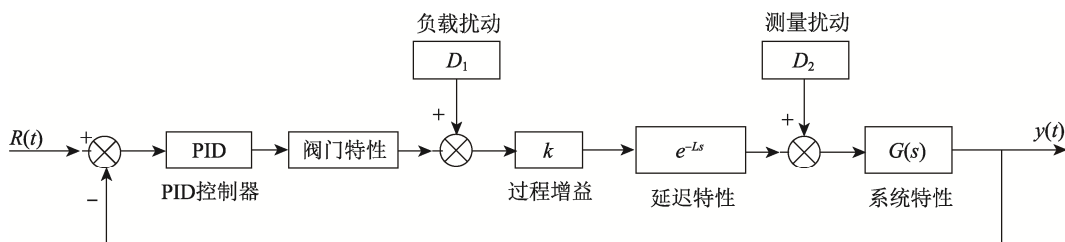


图2 纸浆浓度反馈控制系统模型  
Fig.2 Model of pulp concentration feedback control system

## 2 基于 PID 扰动抑制的差分进化算法

### 2.1 PID 的扰动抑制

为便于处理,图 2 的纸浆浓度控制系统被表示为图 3 中单输入单输出系统,控制系统的离散数学表达式为:

$$y(t) = q^{-b}G(q^{-1})u(t) + N(q^{-1})a(t) \quad (3)$$

式中:  $q^{-1}$  为后移算子;  $q^{-b}G(q^{-1})$  为过程模型;  $G(q^{-1})$  为不含时滞过程的过程模型,过程采样时滞为  $b$ ;  $N(q^{-1})$  为扰动模型,为便于处理,将纸浆浓度控制系统的扰动等效近似为在过程模型后;  $a(t)$  为服从均值为 0 的高斯扰动。

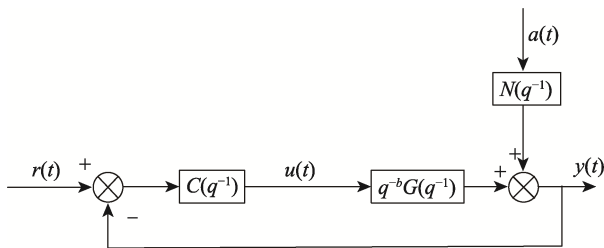


图 3 单回路离散控制系统  
Fig.3 Discrete single-loop control system

PID 控制器的表达式为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{\Delta t}{T_i} \sum_{i=1}^t e(t) + \frac{T_d}{\Delta t} (e(t) - e(t-1)) \right] \quad (4)$$

式(4)中 PID 表达式可以被表示为式(3)中离散 PID 形式<sup>[14]</sup>,即:

$$C(q^{-1}) = \frac{k_1 + k_2 q^{-1} + k_3 q^{-2}}{1 - q^{-1}} \quad (5)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3$  与传统 PID 的参数的关系式为:

$$k_1 = K_p \left( 1 + \frac{\Delta t}{T_i} + \frac{T_d}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

$$k_2 = -K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{\Delta t} \right) \quad (7)$$

$$k_3 = K_p \frac{T_d}{\Delta t} \quad (8)$$

将式(5)带入式(3)中,为了使系统不失一般性,假设设定值  $r(t)=0$ ,则系统的 ARMA 模型可以描述成冲激响应模型:

$$y(t) = -\sum_{i=1}^m s_i (k_1 + k_2 q^{-1} + k_3 q^{-2}) y(t-i) + \sum_{i=0}^{\infty} n_i a(t-i) \quad (9)$$

式中:  $s_i, n_i$  分别为过程模型除以差分算子后的冲激响应模型和扰动模型的冲激响应模型;  $m$  为系统达到稳态的最大采样时间。

考虑某个时刻的扰动  $a(i)$  对输出序列  $y(t)$  的影响,从系统的 ARMA 模型可以看出,单个  $a(i)$  对  $y(t)$  的影响由冲激响应模型决定。通过式(9)可以建立由扰

动  $a(i)$  组成的  $y(t)$  序列,时间序列表达式为:

$$\begin{bmatrix} y_i(i) \\ y_i(i+1) \\ \vdots \\ y_i(i+p) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ s_1 & 0 & & & \\ s_2 & s_1 & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ s_p & s_{p-1} & \cdots & s_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i(i) \\ y_i(i+1) \\ \vdots \\ y_i(i+p) \end{bmatrix} \cdot k_1 - \begin{bmatrix} 0 \\ s_1 & 0 & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ s_p & s_{p-1} & \cdots & s_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y_i(i) \\ \vdots \\ y_i(i+p-1) \end{bmatrix} \cdot k_2 - \begin{bmatrix} 0 \\ s_1 & 0 & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ s_p & s_{p-1} & \cdots & s_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ y_i(i) \\ \vdots \\ y_i(i+p-2) \end{bmatrix} \cdot k_3 + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_p \end{bmatrix} \cdot a_i \quad (10)$$

式中:  $p$  为  $a(i)$  对输出  $y(t)$  有明显影响的最大采样长度,  $p$  一般越大,模型越精确,计算量也越大;  $y_i(t)$  为在  $t$  时刻扰动  $a(i)$  对回路输出  $y(t)$  的贡献水平,即在多个扰动下回路输出  $y(t)$  由对应  $y_i(t)$  组成。定义位移矩阵  $F \in R^{(p+1) \times (p+1)}$ ,则式(10)中单个扰动影响可以表示为:

$$\begin{bmatrix} y_i(i) \\ y_i(i+1) \\ \vdots \\ y_i(i+p) \end{bmatrix} = (I + Sk_1 + FSk_2 + F^2Sk_3)^{-1} \bar{n} a(i) \quad (11)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $S$  为关于  $s_{j=1 \dots p}$  的矩阵。考虑扰动为连续的时间序列的情况,则式(3)可以被表示为:

$$y(t) = \begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_p \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} a(t) \\ a(t-1) \\ \vdots \\ a(t-p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)可以理解为输出  $y(t)$  可由一系列的冲激响应  $\psi_i$  和扰动时间序列组成,对比式(11)中输出的冲激响应模型,式(11)与式(12)具有等价性,即:

$$\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_p \end{bmatrix} = (I + Sk_1 + FSk_2 + F^2Sk_3)^{-1} \bar{n} \quad (13)$$

则易得到纸浆浓度控制系统的输出方差为:

$$V_{PID} = \bar{n}^T (I + S^T k_1 + (FS)^T k_2 + (F^2 S)^T k_3)^{-1} (I + Sk_1 + FSk_2 + F^2 Sk_3)^{-1} \bar{n} \cdot \sigma_a^2 \quad (14)$$

在纸浆浓度控制系统中,通过 PID 参数  $k_1, k_2, k_3$  调节实现对输出方差  $V_{PID}$  的最小化作为扰动抑制的依据,根据输出方差的大小衡量系统的经济效益回

路控制的效果具有一定的实际意义<sup>[2]</sup>。根据式(11)可以看出,当  $V_{PID}$  为有限值,系统对于任意有界输入  $a(t)$  其输出也有界,则系统稳定。

### 2.2 差分进化算法

差分进化算法<sup>[15-16]</sup>是一种群体的启发式算法,通过内部群体的对比优势解集导向进化方向,强化了全局搜索能力,同时也保留了交叉变异操作,使得搜索能力得到提高。相比传统的优化算法,差分进化算法待参数量少,收敛速度快,全局搜索能力强等优点。

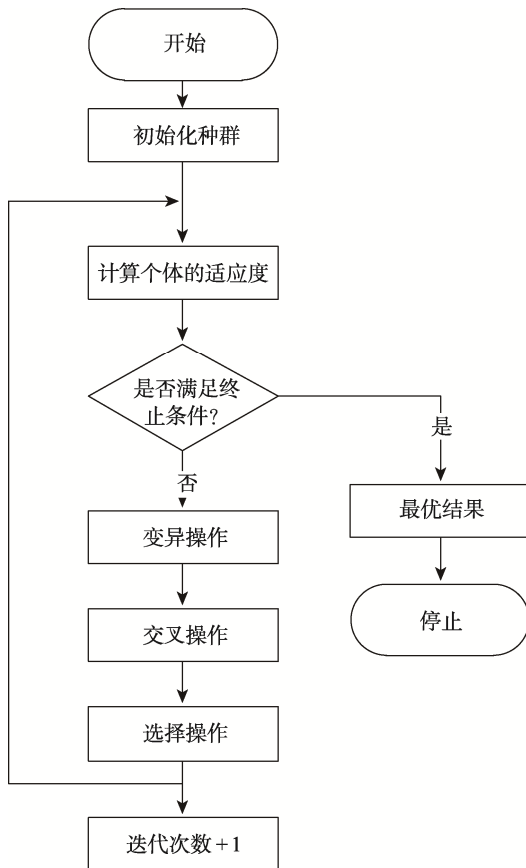


图4 差分进化算法流程

Fig.4 Flow chart of differential evolution algorithm

差分进化算法的初始种群的参数为  $k_1, k_2, k_3$ , 由式(6-8)可知  $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$ , 则文中取  $k_1 \in [0,10], k_2 \in [-10,0], k_3 \in [0,10]$ 。对于复杂的纸浆浓度控制,被控对象的参数具有不确定性,以及PID参数的选取范围,一旦PID参数选取范围选择出错,超出稳定域外,则任何算法都无法保证优化后PID控制系统的稳定性。考虑纸浆浓度系统的不确定性,被控对象分子分母系数在有界范围内波动,式(2)为标称模型,可以使用广义Kharitonov定理来求解PID参数区间保证PID控制器能够镇定整个区间对象族,在该区间内均能保证PID是鲁棒稳定的<sup>[17]</sup>。

差分进化算法需要优化的目标函数为ITAE指标与  $V_{PID}$ ,通过加权两者用以协调控制器的跟踪性能和

扰动抑制性能,用来满足实际纸浆浓度控制的要求,其目标函数为:

$$J = w_1 \int_0^{\infty} t |e(t)| dt + w_2 V_{PID} \quad (15)$$

式中:  $w_1, w_2$  为ITAE指标与PID方差的权值,权值的大小可以通过两者的最小值确定;  $V_{PID}$  的最小值是一个非凸优化问题<sup>[18]</sup>,不通过优化算法无法确定最小值,但如图3所示离散控制系统可以确定该系统的最小方差为  $V_{MVC}$  (非PID控制下),  $V_{PID}$  略小于  $V_{MVC}$ ,可以将  $V_{MVC}$  作为确定权值大小的先验知识。  $V_{MVC}$  可以由扰动模型  $N(q^{-1})$  确定,公式为:

$$N(q^{-1}) = n_0 + n_1 q^{-1} + n_2 q^{-2} + \dots \quad (16)$$

$$V_{MVC} = \sum_{i=0}^{b-1} n_i^2 \sigma_a^2 \quad (17)$$

由图4所示,差分进化算法与其他进化算法相似,其算法的主要流程分成以下4个步骤。

1) 生成初始种群。通过设定的  $k_1, k_2, k_3$  范围确定种群的生成的边界,各个参数等可能的在区间范围内被选取。

2) 种群变异。通过随机选取种群内的2个个体,将其向量的差值乘以缩放因子,按照一定规则与当前种群内的优秀个体相结合。

3) 种群交叉。为增加种群的多样性,按照设定的交叉概率保留或舍去变异操作的结果。

4) 个体选择。通过式(15)的目标函数确定当前种群中每个个体的适应度,由适应度来判断个体是否保留到下一代种群。

### 3 仿真实验

文中使用文献[3]中纸浆浓度控制系统的开环传递函数,见式(18)。

$$G_p(s) = \frac{3}{2s+1} e^{-3s} \quad (18)$$

在Matlab平台进行仿真,在仿真过程中采样间隔  $t=0.1$  s,假设扰动模型为简单的随机游走模型<sup>[19]</sup>,即:

$$N(q^{-1}) = \frac{1}{1-q^{-1}} \quad (19)$$

系统不同权值比例下的阶跃响应见图5,不同权值下的ITAE和  $V_{PID}$  指标性能变化见表1。对比文献[4]中不同算法的单位阶跃响应见图6,其ITAE和  $V_{PID}$  指标性能对比见表1。

在表1中,通过权值比例的调节,纸浆浓度控制系统的方差与ITAE指标受到不同程度的影响。  $w_1/w_2$  为0时,目标函数为纯  $V_{PID}$  指标,差分进化算法将纸浆浓度控制系统的方差最小化,但ITAE指标过大,在阶跃响应仿真中,系统输出发散,表明  $V_{PID}$  指标适用于设定值保持不变的工业环境中,能够保持控制输

表 1 不同权值下的优化结果  
Tab.1 Optimization results under different weights

$w_1/w_2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	ITAE	$V_{PID}$
0	3.1018	-5.7849	2.6783	4004.3	31.1886
0.33	2.9668	-5.6660	2.7094	14.3495	31.8530
3	2.9978	-5.7323	2.7427	12.3377	32.0769
	2.6157	-4.9444	2.3373	9.7847	32.2530

出方差的最小化,  $V_{PID}$  是该 PID 控制系统的可达最小方差。 $w_1/w_2$  为 时, 目标函数为纯 ITAE 指标, 算法将 PID 参数按照 ITAE 指标进行最优化, 仿真结果表明, 系统跟踪性能表现最优, 但对比其他  $w_1/w_2$ , 输出方差的抑制效果相对不佳。 $w_1/w_2$  为 0.3, 3 和 时, 图 5 显示系统的阶跃响应按比值大小超调逐步上升, 调节时间变长。结合表 1 可以看出,  $V_{PID}$  的指标逐步减小。综合表 1 与图 5, PID 控制器调节跟踪性能和扰动抑制具有极限, 当不满足工业高品质要求时, 需要二自由度 PID 控制等控制方法来满足控制要求。

在图 6—7 与表 2—3 中, 文中算法  $w_1/w_2$  设置为 0.33。引用文献[4]中经典的 Z-N 法, 基于单一 ITAE 指标的 PSO 算法以及改进的 SA-PSO 算法。由图 6 和表 3 可知, 文中算法的超调大于 PSO 和 SA-PSO 算法, 但调节时间和上升时间上均优于另外 2 个算

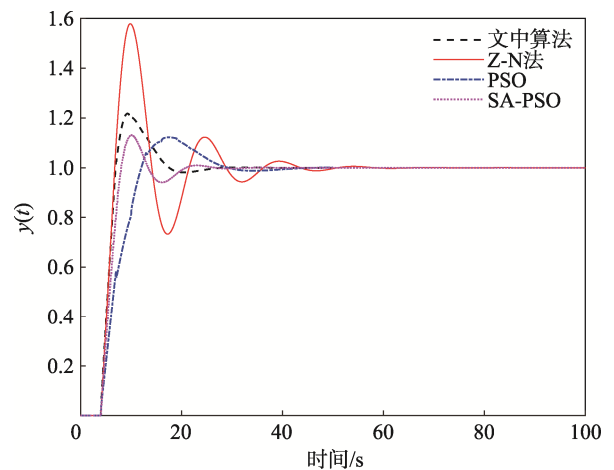


图 6 不同算法下的单位阶跃响应  
Fig.6 Unit step response under different algorithms

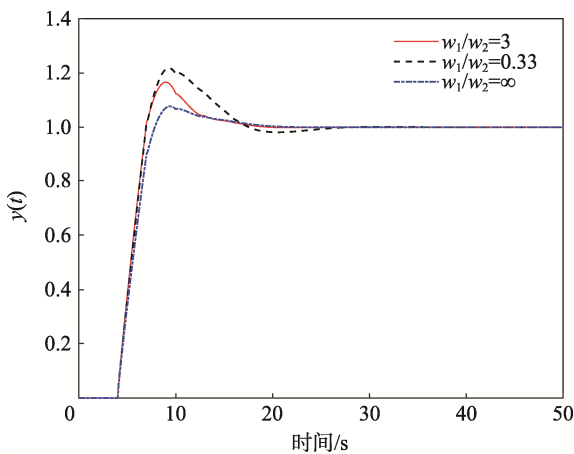


图 5 单位阶跃响应仿真  
Fig.5 Simulation diagram of unit step response

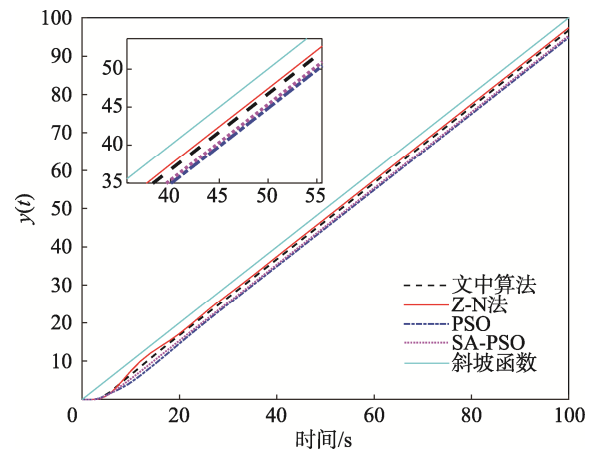


图 7 不同算法下的斜坡响应  
Fig.7 Ramp response under different algorithms

表 2 不同算法的性能指标  
Tab.2 Performance index of different algorithms

方法	$k_1$	$k_2$	$k_3$	ITAE	$V_{PID}$
文中算法	2.9668	-5.6660	2.7094	14.3495	31.8530
Z-N 法	1.2505	-2.2500	1.0125	69.0212	35.1434
PSO	4.1156	-8.0917	3.9826	36.8770	33.9828
SA-PSO	2.0176	-3.8053	1.7949	12.7079	34.8321

表3 不同算法的时域性能指标  
Tab.3 Time domain performance index of different algorithms

方法	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s
文中算法	21.7914	7.0	15.4
Z-N 法	57.9083	6.7	33.1
PSO	12.2586	12.1	24.0
SA-PSO	13.1090	8.0	17.3

法,而传统的 Z-N 法劣于其他算法,仅在上升时间上有所优势。对比表 2 中不同算法下的性能指标,文中算法在  $V_{PID}$  输出方差的指标均由于其他 3 种算法,在 ITAE 指标下仅劣于 SA-PSO 算法。从图 7 可以看出,对于斜坡响应来说,Z-N 法的跟踪误差最小,文中算法次之,PSO 算法最差。仿真对比表明,通过算法优化的 PID 参数明显优于 Z-N 法,而文中算法使用加权参数调节 PID 优化目标相较于基于单一 ITAE 指标的 PSO 等算法,在上升时间,调节时间和  $V_{PID}$  等性能指标上有明显优势,用户可以通过调节权值,协调跟踪和输出方差的性能来满足实际要求。

## 4 结语

文中以纸浆浓度控制系统为例,建立了离散系统下 PID 的可达最小方差作为扰动抑制的依据,结合 ITAE 指标作为差分进化算法的目标函数,并总结了权值的选取条件。不同于二自由度的 PID 控制需要额外的结构或滤波器,文中纸浆浓度控制系统的单 PID 控制即从跟踪性能和扰动抑制性能相结合,更符合实际控制系统的需求。仿真结果表明,基于扰动抑制和跟踪性能的优化指标,通过权值调节可以协调两者的性能以达到实际生产需求的目的。

### 参考文献:

- [1] CHAN K S, LAKSHMINARAYANAN S, RANGAIAH G P. Tuning PID Controllers for Maximum Stochastic Regulatory Performance: Methods and Experimental Verification[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(20): 7787—7799.
- [2] 苏宏业, 谢磊. 工业控制系统性能评估[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 61—62.  
SU Hong-ye, XIE Lei. Performance Evaluation of Industrial Control System[M]. Beijing: Science Press, 2016: 61—62.
- [3] 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.
- [4] 汤伟, 胡祥满, 孙小乐. 基于模拟退火粒子群混合算法的纸浆浓度控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 29—34.  
TANG Wei, HU Xiang-man, SUN Xiao-le. The Control System of Pulp Concentration Based on the Hybrid Algorithm of Simulated Annealed Particle Swarm Optimization[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 29—34.
- [5] 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(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(4): 44—48.
- [6] 高俊. 纸浆浓度的神经网络 PID 控制[J]. 轻工机械, 2007(6): 63—66.  
GAO Jun. Controller by PID with BP Neural Network for Pulp Concentration[J]. Light Industry Machinery, 2007(6): 63—66.
- [7] 董婷. 一种自动称重包装控制系统设计[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 372—377.  
DONG Ting. Control System Design of Automatic Weighing Packaging Machinery[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 372—377.
- [8] 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(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(5): 46—50.
- [9] 苏一新, 马彦会, 石倩, 等. 基于 BP 神经网络模型的磁悬浮水泵 PID 参数优化[J]. 流体机械, 2018, 46(1): 20—24.  
SU Yi-xin, MA Yan-hui, SHI Qian, et al. PID Parameters Optimization on Magnetic Suspension Pump Based on the BP Neural Network Model[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(1): 20—24.
- [10] 赵倩梅, 陈帅帅, 胡慕伊, 等. 纸浆浓度的专家-模糊 PID 控制系统[J]. 中国造纸, 2015, 34(12): 59—62.  
ZHAO Qian-mei, CHEN Shuai-shuai, HU Mu-yi, et al. The Expert-fuzzy PID Control System of Pulp Concentration[J]. China Pulp & Paper, 2015, 34(12): 59—62.
- [11] 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): 51—56.  
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): 51—56.
- [12] 周海君, 王孟效, 邹伟. 基于 PID 的专家控制在纸浆



- 浓度控制中的应用[J]. 造纸科学与技术, 2011, 30(2): 56—61.
- ZHOU Hai-jun, WANG Meng-xiao, ZOU Wei. The Application of Expert PID Control Algorithm in Pulp Consistency Control Loop[J]. Paper Science & Technology, 2011, 30(2): 56—61.
- [13] 黄亚南, 张爱娟, 胡慕伊. 基于免疫-单神经元 PID 算法的纸浆浓度控制[J]. 中国造纸学报, 2016, 31(3): 30—35.
- HUANG Ya-nan, ZHANG Ai-juan, HU Mu-yi. Pulp Consistency Control Based on Immune-single Neuron Algorithm[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2016, 31(3): 30—35.
- [14] VISIOLI, ANTONIO. Practical PID Control[M]. Berlin: Springer, 2006: 13—15.
- [15] 丁青锋, 尹晓宇. 差分进化算法综述[J]. 智能系统学报, 2017(4): 431—442.
- DING Qing-feng, YIN Xiao-yu. Research Survey of Differential Evolution Algorithms[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017(4): 431—442.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 331—356.
- LIU Jin-kun. Matlab Simulation of Advanced PID Control[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 331—356.
- [17] 彭瑞, 岳继光. 基于区间分析的参数不确定系统 PID 鲁棒控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2006(4): 74—77.
- PENG Rui, YUE Ji-guang. Robust Design of PID Controller for Interval Plants Based on Interval Analysis[J]. Electric Machines and Control, 2006(4): 74—77.
- [18] SENDJAJA A Y, KARIWALA V. Achievable PID Performance Using Sums of Squares Programming[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(6): 1061—1065.
- [19] 乔治·博克斯, 格威利姆·詹金斯, 格雷戈里·莱茵泽尔, 等. 时间序列分析预测与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 4—8.
- BOX G E P, JENKINS G M, GREGORY C R. Time Series Analysis, Forecasting and Control[J]. Beijing: China Machine Press, 2011: 4—8.