

基于改进量子粒子群算法的纸浆浓度控制系统

郑飞¹, 汤兵勇²

(1.佛山开放大学 理工学院, 佛山 528000; 2.东华大学 旭日工商管理学院, 上海 200051)

摘要: **目的** 为了克服传统 PID 控制在具有大时滞性、非线性等特点的纸浆浓度控制系统中性能不足和参数调整困难等问题, 研究参数在线调整的方法。**方法** 在传统 PID 控制的基础上, 结合量子粒子群仿生算法 (QPSO), 提出一种量子粒子群算法优化的传统 PID 控制器参数, 并应用于纸浆浓度控制系统; 同时对基本量子粒子群算法进行改进, 引入交叉算子, 并将该控制算法应用到纸浆浓度控制系统中, 并与传统控制进行对比。**结果** 与传统 PID 控制和基本量子粒子群优化的 PID 相比较, 改进的优化算法能够得到更加令人满意的控制效果, 具有系统超调量小、响应速度快、鲁棒性高等优良的性能。**结论** 基于改进的量子粒子群优化算法的纸浆浓度控制系统可有效控制纸浆浓度, 能够明显提高系统的控制精度等性能指标, 更好地满足实际应用的要求。

关键词: 纸浆浓度; 时滞性; 传统 PID 控制; 量子粒子群算法; 交叉算子; 参数优化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)05-0196-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.027

Pulp Concentration Control System Based on Improved Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHENG Fei¹, TANG Bing-yong²

(1.Science & Engineering College, Foshan Open University, Foshan 528000, China;

2.Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai 200051, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the method of online parameter adjustment to overcome the shortcomings of traditional PID control in pulp consistency control system with large time delay and non-linearity and the difficulty of parameter adjustment. Based on traditional PID control and in combination with quantum particle swarm optimization (QPSO) bionic algorithm, this paper proposed a traditional PID controller parameters optimized by QPSO and applied it to pulp concentration control system. At the same time, the basic QPSO algorithm was improved by introducing crossover operator, and the control algorithm was applied to pulp concentration control. The system was compared with traditional control. The result showed that compared with the traditional PID control and the basic quantum particle swarm optimization (QPSO) PID, the improved optimization algorithm could achieve more satisfactory control effect. The system had the advantages of small overshoot, fast response speed and high robustness. Pulp consistency control system based on improved quantum particle swarm optimization algorithm can effectively control pulp consistency, significantly improve the control accuracy and other performance indicators of the system, and better meet the requirements of practical application.

KEY WORDS: pulp concentration; time lag; traditional PID control; quantum particle swarm optimization; crossover operator; parameter optimization

收稿日期: 2018-11-14

基金项目: 广东远程开放教育科研基金 (YJ1807); 佛山市社科规划项目 (2018-GJ059)

作者简介: 郑飞 (1965—), 男, 博士, 佛山开放大学副教授, 主要研究方向为智能控制。

纸浆浓度与纸张质量之间存在着紧密的关联,稳定的纸浆浓度是实现工艺目标、纸张质量合格、提高其质量的前提,同时也是较难克服的难点。在纸浆造纸的工业生产过程中,纸浆以高浓度储存,通过浓度调节系统进行不停的加水稀释和脱水浓缩来维持稳定的纸浆浓度,因此纸浆浓度将一直处在外界干扰的状态,波动较大,进而会直接影响到造纸的品质,更加造成了原料的浪费^[1]。在实际生产过程中,存在很多不确定的因素,纸浆浓度控制系统的数学模型是无法准确建立的。此系统是一个干扰多、纯滞后的系统,滞后时间与泵的频率、流速、压力等因素有关,这些给传统控制带来了难点^[2]。目前,纸浆浓度控制系统大多采用传统的 PID 控制,其参数一旦设定将无法根据工艺生产的具体情况在线调整,无法很好地解决纸浆浓度控制系统中存在的固有变化和扰动,采用固定参数的传统 PID 控制在系统过程参数改变时,将很难获得令人满意的控制效果^[3],为了实时获得最优的控制效果,采用在线调整参数的 PID 控制器。目前,针对 PID 参数的优化现阶段有很多,主要有单纯形法、梯度法、神经网络算法、模糊算法、PSO 算法等其他算法及其改进算法。这些方法虽然能够使系统性能有所改善,但是在控制过程中却存在着一些弊端,如对初值比较敏感,容易陷入局部最优解,造成寻优失败。如神经网络算法^[4]:该算法需要大样本训练,且容易出现数值病态和陷入局部最优问题,控制效果有时难以达到理想值,且神经网络具有不稳定性。模糊算法^[5]:模糊推理受知识库的影响较大,专家经验获取随机性大,同时模糊规则使算法复杂化等。PSO 算法^[6]:对具有多个局部极值点的函数易早熟,陷入局部最优。文中在传统 PID 控制的基础上,结合量子粒子群算法及其改进算法,提出量子粒子群算法优化传统 PID 控制器的参数。

1 纸浆浓度控制系统

1.1 控制系统组成及调节原理

纸浆浓度是决定着纸张质量的一个关键参数,是

造纸工艺过程中严格精准控制的一个重要参数。稳定均匀的纸浆浓度,可使整个造纸工艺过程变得更加稳定,稳定打浆效果,提高生产稳定性,降低纸张定量的波动,提升纸张的品质^[7]。常用的纸浆浓度控制系统可用配浆箱之前的纸浆浓度调节为例,见图 1^[8],系统由浆池、白水道、调节阀(控制器)、浓度传感器、冲浆泵等组成。纸浆浓度在进入配浆池前通过管道上安装的浓度传感器,用来实时检测纸浆浓度的信号,并传送到控制器,控制器根据浓度的设定值与反馈值进行比较,由两者之间的差值来调节调节阀的阀门开度来控制稀释水的大小,通过稀释水将纸浆浓度调节到系统设定值,最后通过冲浆泵将纸浆浓度送到纸机进行纸张的生产抄造。

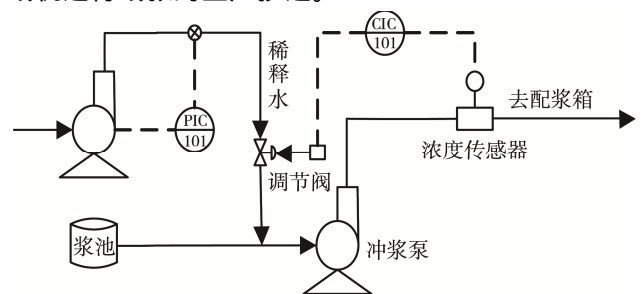


图 1 纸浆浓度控制系统

Fig.1 Pulp concentration control system

1.2 纸浆浓度的数学模型

根据图 1 所示的纸浆浓度控制系统以及其工作原理可知,纸浆浓度控制方框图见图 2^[9]。其中 $R(s)$ 为纸浆浓度设定值;PID 为控制器、 K 为过程增益、 e^{-Ls} 为延迟特性、 $G_p(s)$ 为系统特性分别由阀门动态特性、稀释水与纸浆的混合过程、浓度变送器动态特性组成的,且均为一节惯性环节; $Y(s)$ 为纸浆浓度输出、 $D_L(s)$ 为负载干扰、 $D_M(s)$ 为测量干扰。

由图 2 的方框图可知纸浆浓度的数学模型,在忽略负载干扰、测量干扰以及阀门特性后得到广义对象控制数学模型的传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{(T_d s + 1)(T_p s + 1)(T_b s + 1)} e^{-Ls} \quad (1)$$

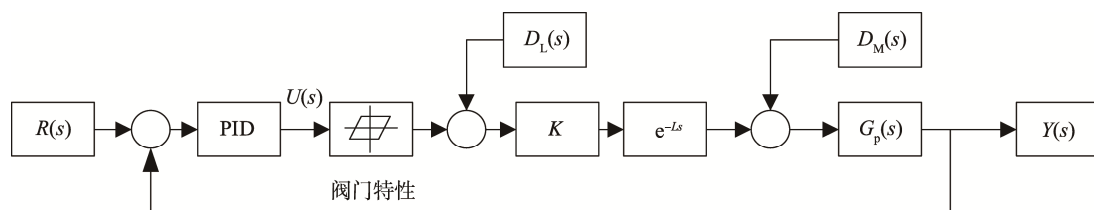


图 2 纸浆浓度控制

Fig.2 Control of pulp concentration

式中: $Y(s)$ 为纸浆浓度输出; $U(s)$ 为阀门开度; K 为过程增益; e^{-Ls} 为延迟特性; T_a , T_p , T_b 分别为阀

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的惯性时间常数。

在实际纸浆浓度控制过程中,3个惯性环节获取较为困难,同时其惯性时间常数 T_a , T_p , T_b 也不大,所以对式(1)进行简化为一阶纯滞后的惯性环节,其数学模型为^[10]:

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

式中: T 为惯性时间常数。

2 基本量子粒子群算法及其改进算法

2.1 基本量子粒子群算法(QPSO)

量子粒子群算法是在传统的粒子群算法的基础上改进而来,它借助量子力学的思想,改变了传统PSO算法的收敛方式——轨道形式和粒子速度的限制。量子系统内的粒子通过概率密度函数来表达其实际的状态,处于量子系统内的粒子可以出现在可行域内的任何地方,仅仅是概率的大小。为了增加粒子间的协同能力,与传统的PSO算法不同的是在量子粒子群算法中引入了平均最好位置,大大提高了算法的全局搜索能力^[11]。在QPSO算法中,其运动状态却可以用波动函数 $\psi(x,t)$ 来描述,通过波动函数给定的概率密度函数来确定粒子在某个时刻某个位置出现的概率,并采用MontCarlo来随机模拟粒子的位置^[12]:

$$X(t) = p \pm \frac{L}{2} \times \ln \frac{1}{u} \quad (3)$$

式中: $u \in (0,1)$; L 的值由式(4)确定。

$$L(t) = 2\beta \times |C(t) - X(t)| \quad (4)$$

$$\beta = (1-0.5) \times (T-t) / (T+0.5) \quad (5)$$

最后得到QPSO算法的进化方程为:

$$C(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i(t) = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_{i1}(t), \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_{i2}(t), \dots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_{id}(t) \right] \quad (6)$$

$$p_{id} = \theta \times p_{id} + (1-\theta) \times p_{gd} \quad (7)$$

$$X_{id}(t+1) = p_{id} \pm \beta \times |C(t)_{id} - X_{id}(t)| \times \ln \frac{1}{u} \quad (8)$$

式中: M 为种群中粒子数目; D 为粒子维数; T 为迭代次数; u 和 θ 为在 $(0,1)$ 上均匀分布的随机数; $C(t)$ 为粒子群的平均最好位置; p_i 为粒子 i 的最好位置; p_g 为所有粒子所经历的最好位置; β 为称为收缩-扩张系数。

其中, β 是QPSO算法的唯一参数,目前普遍采用从1.0递减到0.5。在式(8)中, $\pm$ 号取决于 $\text{rand}()$ 函数,当 $\text{rand}>0.5$ 时取负号,反之取正号。

2.2 改进量子粒子群算法(IQPSO)

虽然量子粒子群算法较传统PSO算法的全局搜索能力提高了,但是算法本身也存在着一些弊端,算

法在种群初始化的时候仍然是随机性的,且在算法刚开始迭代时,也具有较大的盲目性。同时,对于基本的QPSO算法,其并没有从根本去解决PSO算法在搜索后期的早熟缺陷,随着迭代次数的增加,粒子群会逐渐趋近相似,粒子群多样性减弱,易陷入局部最优,进而影响算法的稳定性。研究表明^[13],当 β 按式(5)线性变化,随着迭代的进行,粒子群会逐渐聚集收拢,搜索范围会逐渐减小,直至停滞。

为克服基本量子粒子群算法的不足,文中提出了一种改进的策略,即:带交叉算子的QPSO算法,简称IQPSO。该算法先利用混沌序列初始化种群来加强算法搜索的多样性,在通过 $\text{sortrows}()$ 算出全部粒子的适应度值并按升序进行排列,然后取适应度值前 $N/2$ 个粒子放入下一代,后 $N/2$ 个粒子参加交叉变异。交叉结束后,选择交叉后的适应度值最优的前 $N/2$ 个粒子进入下一代。这样做保证了粒子群后期的多样性,避免早熟收敛问题的发生。

与基本QPSO算法相比,改进的量子粒子群算法通过适应度值来选择不好的粒子进行交叉变异来增加算法的多样性和全局搜索能力等。虽然前人对粒子群算法(PSO)也做过大量改进(如:带惯性权重的算法、带收缩因子的算法、小生境粒子群算法等),这些改进在一定程度上提高了算法的搜索能力,但是没有根本解决粒子群算法100%能搜到全局最优解,仍存在早熟现象。量子粒子群算法是一个与典型的随机系统远远不同的不确定系统,在这样的一个系统中,一个粒子能够以某一确定的概率出现在搜索空间中的任意一个位置,因为粒子没有一个确定的轨迹。此外,在传统的PSO算法中,有限的搜索范围将粒子限制在了一个固定的区域,而在QPSO算法中,粒子能够以某一确定的概率出现在整个可行的搜索空间中的任意一个位置,这也是与其他算法及改进算法的区别和优势。

3 基于IQPSO算法的控制器参数优化结构

针对传统PID控制器参数无法在线调整的问题,设计了基于改进量子粒子群优化PID参数的控制器。对于传统PID控制器的比例积分微分 K_p , K_i , K_d 的3个参数只单纯的由工作人员盲目的调节,将很难得到满意的控制效果,同时也非常的麻烦,随机性大。文中引入改进的量子粒子群算法来优化以上参数,使其获得最优解。并采用的指标为ITAE指标,它能综合反应系统的偏差和时间之间的关系,其值越小越好,表达式可描述为^[14]:

$$J = \int_0^x t |e(t)| dt \quad (9)$$

其中, IQPSO 算法的控制器参数的优化结构见图 3。

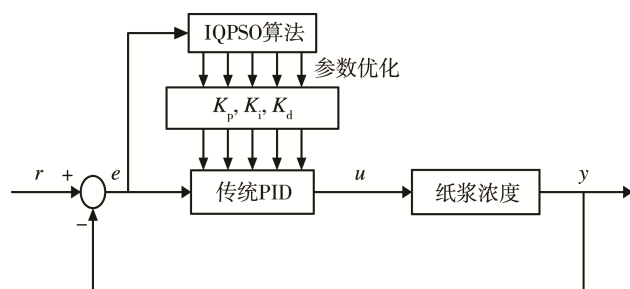


图 3 基于 IQPSO 的 PID 优化结构

Fig.3 PID optimization structure based on IQPSO

算法通过 Matlab 软件中的 .m 文件与 Simulink 中搭建的模型系统联系起来, 联系的桥梁为量子粒子群的粒子, 具体过程见图 4^[15]。利用 Matlab 软件编写 QPSO/IQPSO 算法来优化模糊自适应 PID 的参数, 在 assignin 函数的调用下将 QPSO/IQPSO 算法优化的参数送到 Simulink 模型进行仿真, 得到了对应的性能指标并传递到量子粒子群算法中作为粒子的适应度值, 并判断是否满足终止条件。

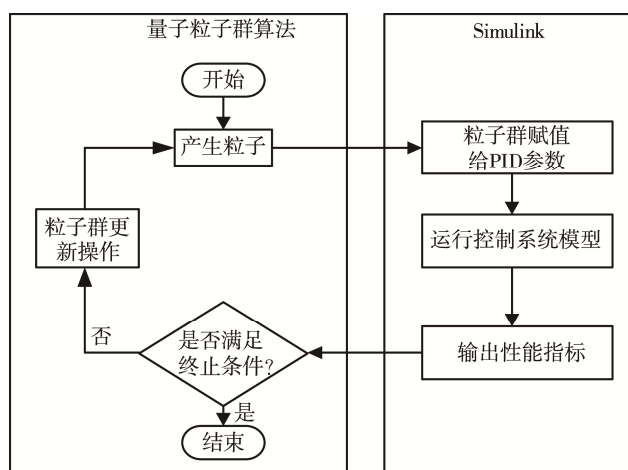


图 4 QPSO 优化控制器的参数过程

Fig.4 Parameter process of QPSO optimized controller

4 仿真结果

通过前面对纸浆浓度控制系模型的分析, 其传递函数可以用一个一阶惯性加纯延迟环节来表达见式 (2), 并搭建了纸浆浓度控制系的 Simulink 仿真模型。文中参考文献[8]得出某纸浆浓度控制过程的简化模型:

$$G(s) = \frac{3}{2s+1} e^{-3s} \quad (10)$$

实验中, QPSO 算法的主要参数设置为 $M=60$, $D=3$, $T=30$, $w_{\max}=0.9$, $w_{\min}=0.4$ 。分别采用传统的 PID 控制, 基本量子粒子群算法优化的 PID 控制

(QPSO-PID) 和改进的量子粒子群算法优化的 PID 控制 (IQPSO-PID) 对纸浆浓度控制系统进行仿真对比分析, 其结果见图 5。由图 5 可知, 文中提出的方法 (IQPSO-PID 控制) 要比 QPSO-PID 控制和传统的 PID 控制具有更加优良的性能指标, 文中方法超调量更小、上升时间更快、稳态误差更小等。其中, 在斜坡函数下的仿真曲线见图 6, 通过局部放大可以看出, 改进的量子粒子群算法 (IQPSO) 优化后的参数能够达到最优, 误差最小, 跟踪效果最好。

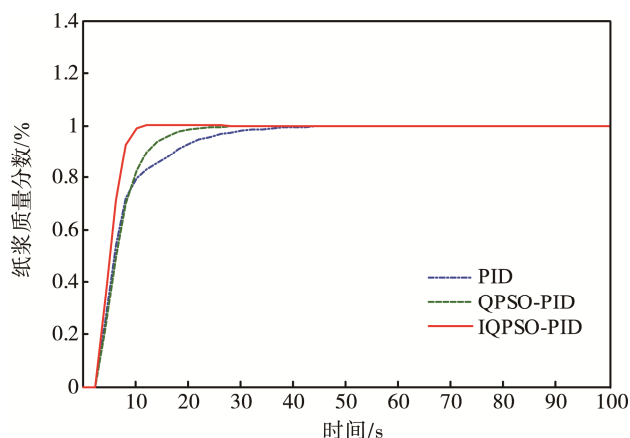


图 5 单位阶跃仿真曲线 (质量分数)

Fig.5 Unit step simulation curve (mass fraction)

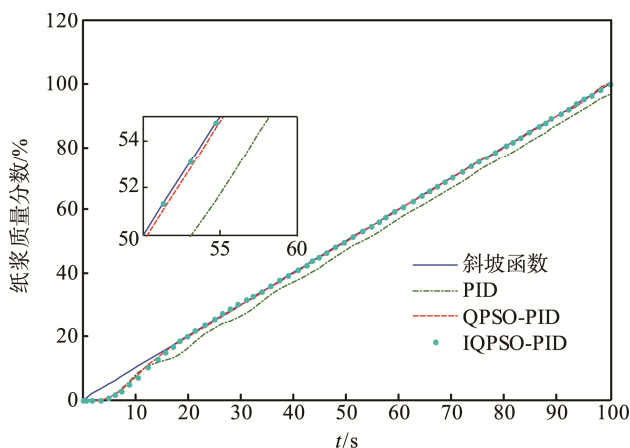


图 6 斜坡函数仿真曲线

Fig.6 Slope function simulation curve

由于在实际工业造纸过程中, 纸浆浓度调节回路中存在许多干扰 (纸浆稀释水的加入、脱水、测量误差等), 为了验证算法的鲁棒性能, 将被控制对象的模型参数进行调整: 将对象纯滞后时间常数 L 增大 17% 左右, 系统时间常数 T 增大 15%, 开环增益 K 减小 6% 左右。通过以上改变来模拟扰动对系统的影响, 在模型失配的情况下, 以上 3 种算法在单位阶跃函数输入下的仿真结果见图 7。由图 7 可知, IQPSO-PID 控制在参数摄动的情况下, 仍然表现出强大的性能, 具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

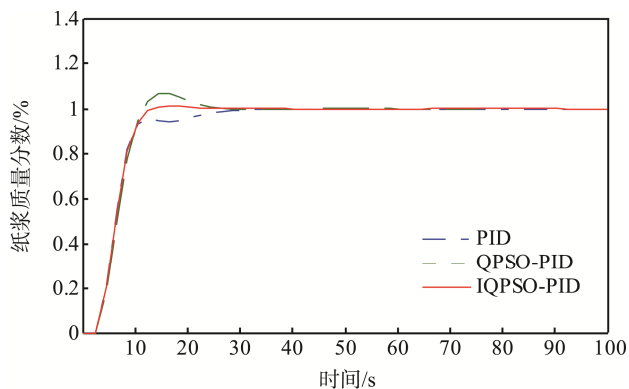


图7 模型失配时动态响应曲线

Fig.7 Dynamic response curve of model mismatch

5 结语

纸浆浓度控制系统是一个非线性、大滞后的复杂系统,针对传统的PID控制的参数无法在线调整,进而无法使纸浆浓度控制系统得到良好的动静态性能。为此提出了量子粒子群及其改进算法来优化传统PID参数,通过引入交叉算子以及混沌初始化等措施,改善了粒子前期搜索的盲目性,减小了其陷入局部极值的概率,并将其与传统PID控制结合,能够对纸浆浓度控制系统进行有效控制。仿真结果表明,IQPSO算法优化的PID控制器的综合性能评价指标更好,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,使系统获得最佳控制。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高玉琪. 基于模糊 PID 的淘汰机排料控制的仿真实验研究[J]. 煤矿机械, 2014(6): 74—76.
GAO Yu-qi. Simulation Study on Jigger Discharging System Based on Fuzzy PID Control[J]. Coal Mine Machinery, 2014(6): 74—76.
- [6] 孙俊, 方伟, 吴小俊, 等. 量子行为粒子群优化: 原理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
SUN Jun, FANG Wei, WU Xiao-jun, et al. Quantum Behaved Particle Swarm Optimization: Principles and Applications[M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 2011.
- [7] 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(1): 146—150.
- [8] 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): 15—20.
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): 15—20.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 乔莹莹, 宋威, 马伟. 基于 GA 优化 QPSO 算法的文本聚类[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(10): 2912—2915.
QIAO Ying-ying, SONG Wei, MA Wei. Text Clustering Based on QPSO Algorithm Optimized by GA[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(10): 2912—2915.
- [12] 夏华凤, 张中国, 刘艳君. 船舶锚机控制系统量子粒子群优化 PID 算法的研究[J]. 电工电气, 2016, 1(4): 25—29.
XIA Hua-feng, ZHANG Zhong-guo, LIU Yan-jun. Study on PID Algorithm Based on Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Used in Ship Windlass

- Control System[J]. Electrotechnics Electric, 2016, 1(4): 25—29.
- [13] 朱三毛. 基于 QPSO 算法的除铜过程锌粉添加量优化方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- ZHU San-mao, Optimization of Zinc Dust Addition for Copper Removal Process Based on QPSO Algorithm[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [14] 吕亭亭, 马小平, 陈力. 基于遗传算法优化的跳汰机排料系统 PID 控制仿真[J]. 工况自动化, 2013, 39(1): 68—70.
- LYU Ting-ting, MA Xiao-ping, CHEN Li. Simulation of PID Control of Jig Discharging System Optimized by Genetic Algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(1): 68—70.
- [15] 霍延军. 基于量子粒子群算法的 PID 参数自整定方法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(10): 194—197.
- HUO Yan-jun. PID Self Tuning Method Based on Quantum Behaved Particle Swarm Optimization[J]. Microelectronics and Computer, 2012, 29(10): 194—197.