

基于 H_∞ 理论的信息熵 PSO 算法整定大时滞 PID 参数

汤伟^{1,2}, 袁志敏¹, 任革健³, 单文娟¹, 冯波¹

(1. 陕西科技大学 电气与信息工程学院, 西安 710021; 2. 陕西农产品加工技术研究院, 西安 710021; 3. 西安渭丰纸业有限公司, 渭南 710300)

摘要: **目的** 针对粒子群算法 (PSO) 整定大时滞 PID 控制器参数过程中搜索范围较大, 搜索能力较差, 甚至出现不收敛的问题, 提出一种基于 H_∞ 理论的小范围搜索且带有目标性初始化粒子群的改进 PSO 算法 (HOI-PSO)。**方法** 利用 H_∞ 理论确定 PSO 算法的初始搜索范围, 融合信息熵对初始化粒子群进行评估、调整, 从而获得分散性较高的初始种群。**结果** Matlab 仿真实验表明, HOI-PSO 算法能够提高 PSO 算法的收敛速度, 具有同大范围相似甚至更好的全局寻优能力; 对于大时滞过程控制, 闭环系统的控制性能得到很大改善。**结论** HOI-PSO 算法应用于长网造纸机定量回路控制结果表明, 采用信息熵 PSO 算法整定出的 PID 控制器参数对大时滞过程具有良好的控制效果, 在实际生产中也具有一定的理论指导意义。

关键词: 粒子群算法; H_∞ 理论; 信息熵; PID 参数整定; 长网造纸机; 定量控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0157-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.026

Tuning of PID Controller Parameters Based on Information Entropy PSO Algorithm with H_∞ Theory for Large Time Delay Processes

TANG Wei^{1,2}, YUAN Zhi-min¹, REN Ge-jian³, SHAN Wen-juan¹, FENG Bo¹

(1. College of Electric and Communication Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Research Institute of Agricultural Products Processing Technology, Xi'an 710021, China; 3. Xi'an Weifeng Paper Industries Co., Ltd., Xi'an 710300, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a modified PSO algorithm based on H_∞ theory with small search space and objectively initialized particle swarm (HOI-PSO) regarding the problem that during tuning PID controller parameters for large time delay processes, particle swarm optimization (PSO) with large search space will have poor search ability and even cannot converge. H_∞ theory was used to determine the initial search band for PSO. Information entropy was integrated to evaluate and tune the initialized particle swarm in order to get the initial population of higher dispersion. Matlab simulation showed that, HOI-PSO algorithm could enhance the convergence speed of PSO algorithm and had the similar or even better global optimization capability as the scope of large range search; for large time delay process control, the control performance of the closed loop system was greatly improved. The results of the application of HOI-PSO algorithm in the control of the basis weight loop of the fourdrinier paper machine show that, the PID controller parameters tuned by the information entropy PSO algorithm have good control effect on the large time delay process and vide certain theoretical guiding significance in actual production.

KEY WORDS: particle swarm optimization; H_∞ theory; information entropy; PID parameters tuning; basis weight control; fourdrinier paper machine

收稿日期: 2018-01-08

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 (2012KTCQ01-19)

作者简介: 汤伟 (1971—), 男, 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。

大时滞系统广泛地存在于实际的工业生产控制中,一直是控制领域的典型难题,受到过程控制界的广泛关注^[1]。大时滞控制方法主要包括:经典控制方法,如 PID 控制、Smith 预估控制等;现代控制方法,如内模控制、预测控制及自适应控制等;智能控制方法,如模糊逻辑控制、神经网络控制、专家控制等方面^[2]。上述控制方法中, PID 控制器由于具有结构简单、不依赖于模型、易于实现等优点被广泛应用,但其能否用于大时滞过程控制的关键在于它的控制器参数如何整定^[3]。

目前, PID 参数整定方法主要分为 2 类:传统参数整定法,如 Z-N 法、单纯形法、幅值裕度法等;智能化参数整定法,如基于粒子群算法、蚁群算法、预测控制、模糊逻辑、神经网络、专家控制等智能 PID 优化方法^[4-5]。粒子群算法(PSO)作为一种高效、简单的并行搜索算法,具有程序易实现、参数调整等优点,被广泛应用于 PID 参数优化过程中^[6]。针对 PSO 算法优化 PID 参数过程存在早熟、易陷入局部最优、收敛速度慢等问题,大量针对粒子初始化过程的改进 PSO 算法被提出,杜继永等^[7]围绕加权重心位置对粒子进行初始化,引导粒子突破局部极值。朱海梅等^[8]采用混沌序列进行初始化,配合早熟判断机制,加速了 PSO 算法的收敛和维持了群体的多样性。高宪文等^[9]采用熵极大的初始化方法,增强初始化粒子群的多样性,克服粒子群早熟问题。以上改进算法一定程度地提高了算法性能,但不能完全解决 PSO 算法优化大时滞 PID 参数过程中算法早熟、大范围搜索收敛速度慢、维数灾难等问题。

针对以上问题,文中提出一种基于 H_∞ 理论的小范围搜索且带有目标性初始化粒子群的改进 PSO 算法(HOI-PSO)。该算法利用 H_∞ 理论对种群初始搜索范围进行确定,结合信息熵概念对粒子相似度进行评估、调整,从而保证粒子群在小范围内的多样性。将该控制算法应用于长网纸机纸张定量控制提高纸张质量,使得企业的生产效益在一定程度上得到了保障。

1 标准 PSO 算法

PSO 算法是 Kennedy 和 Eberhart 根据鸟类捕食行为发明的一种全局优化算法^[10]。算法在 d 维空间中存在 m 个粒子,则第 t 次迭代后粒子 i 的当前位置为 $x_i^t = [x_{i1}, x_{i2} \cdots x_{id}]$, 当前速度为 $v_i^t = [v_{i1}, v_{i2} \cdots v_{id}]$ 。设粒子 i 所经历的最好位置为 $p_i^t = [p_{i1}, p_{i2} \cdots p_{id}]$, 群体所经历的最好位置为 g^t 。粒子根据自身当前的速度和位置进行迭代,则第 $(t+1)$ 次的迭代公式见式(1—2)。

$$v_i^{t+1} = \omega^t v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g^t - x_i^t) \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2)$$

式中: r_1, r_2 为在 $[0,1]$ 之间相互独立且均匀分布的

随机数; c_1, c_2 为学习因子,通常取 $c_1=c_2=2$; ω^t 为惯性权重,通常采用线性递减的方式,平衡算法局部寻优和全局寻优能力。为了迭代过程中避免粒子冲出搜索空间,一般限定粒子位置的取值范围为 $[L_d, H_d]$ 、最大搜索速度为 $v_{\max}$, 以此对粒子的移动范围进行限制,达到对算法更好的控制^[11]。

尽管针对 PSO 算法易早熟,陷入局部最优等方面,基于参数设定、早熟判断机制等方法的改进 PSO 算法被提出且一定程度地提高了算法性能,但很难从根本上解决算法大范围搜索空间下易早熟、陷入局部最优、停滞等问题。

2 基于 H_∞ 理论的信息熵 PSO 算法初始化 PID 参数范围

2.1 基于 H_∞ 理论的 PID 参数初始范围选定

H_∞ 理论是 Zames 在 1981 年提出来的,许多控制问题可以统一于标准 H_∞ 控制问题^[12]。单回路单位反馈控制系统见图 1, 其中 $G_c(s)$ 为控制器, $G_p(s)$ 为被控对象, $r(t)$ 为参考输入, $y(t)$ 为被控对象的输出, d 为外部干扰。

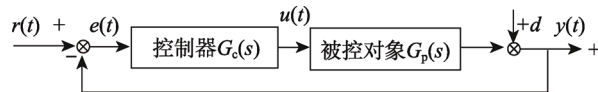


图 1 单位反馈控制系统原理

Fig.1 Principle of unit feedback control system

根据 H_∞ 理论,能使得闭环系统内部稳定的控制器被参数化为:

$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{1 - G_p(s)Q(s)} \quad (3)$$

式中: $Q(s)$ 为任意稳定的有理传递函数。在标称情况下,从外部干扰 d 到被控对象输出 $y(t)$ 间的传递函数即灵敏度函数为:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} = 1 - G_p(s)Q(s) \quad (4)$$

取系统的标称性能指标为 H_∞ 最优,即 $h_{\min} = \|W(s)S(s)\|_\infty$ 。其中,滤波权函数,其选取应使系统输入的 2 范数单位有界,即 $D(s) = W(s)D'(s)$, $D'(s) \leq 1$ 。设 $D(s)=1/s$ 为阶跃干扰,则 $W(s)=D(s)$ 。考虑渐进跟踪要求,则需满足约束:

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [1 - G_p(s)Q(s)] = 0 \quad (5)$$

在复杂工业过程控制中,二阶系统极为普遍,所以选取二阶系统作为被控对象具有较大的实际意义,其数学模型为:

$$G_p(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} \approx \frac{K(1 - \tau s/2)}{(T_1 s + 1)(1 + \tau s/2)} \quad (6)$$

根据最大模定量, 可得到最佳解为 $Q_{op}(s) = (T_1s+1)(1+\tau s/2)/K$, 为了使 $Q_{op}(s)$ 正则可实现, 选择低通滤波器 $J(s) = 1/(\lambda s+1)^2, \lambda > 0$, 对其进行衰减, 则:

$$Q(s) = Q_{op}(s)J(s) = \frac{(T_1s+1)(\tau s/2+1)}{K(\lambda s+1)^2} \quad (7)$$

当 $\lambda \rightarrow 0$ 时, $Q(s)$ 趋向于最优, 单位反馈回路控制器为:

$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{1-G_p(s)Q(s)} = \frac{1}{K} \frac{(T_1s+1)(\tau s/2+1)}{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \tau/2)s} \quad (8)$$

$$\text{将其与实际 PID 控制器 } G_{cl}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_i s + 1} \right)$$

相比较, 得到控制器的参数为:

$$\begin{cases} T_f = \frac{\lambda^2}{2\lambda + \tau/2} \\ T_i = \tau/2 + T_1 - T_f \\ T_d = \frac{\tau T_1}{2T_i} - T_f \\ K_p = \frac{T_i}{K(2\lambda + \tau/2)} \\ K_i = \frac{K_p}{T_i} \\ K_d = K_p T_d \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, PID 控制器的参数仅由 λ 决定, 取 $\lambda = \alpha\tau$, 且一般取值^[13]为 $\alpha \in [0.2, 1.2]$ 。分别将 $\lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 代入式 (9) 中, 从而得到可以系统稳定的 PID 控制器参数范围, 即粒子群的初始化位置范围上下限为:

$$\begin{cases} K_p \in \left[\frac{T_i}{2.9K\tau}, \frac{T_i}{0.9K\tau} \right] \\ K_i \in \left[\frac{T_i^2}{2.9K\tau}, \frac{T_i^2}{0.9K\tau} \right] \\ K_d \in \left[\frac{T_i T_d}{2.9K\tau}, \frac{T_i T_d}{0.9K\tau} \right] \end{cases} \quad (10)$$

与传统 Z-N 法限定 PID 参数相比, 文中引入 H_∞ 理论对 PID 参数整定的初始范围进行限定, 能大大降低搜索的范围, 避免了搜索的盲目性及寻优结果变化量过大、甚至出现失调的现象。

2.2 信息熵 PSO 算法初始化大时滞 PID 参数

H_∞ 理论的引入, 虽然减小可搜索范围, 但利用随机序列却不能保证初始粒子的多样性, 为了保证小范围搜索空间内粒子的多样性, 采用信息熵^[13]的办法对粒子位置进行初始化, 从而加快粒子的搜索速度和收敛精度, 保证小范围搜索的全局寻优能力。

针对 PID 控制器参数 K_p, K_i, K_d 整定问题, 粒子搜索空间由参数 x_{id} 组成。用矩阵 P 可以表示为:

$$P(m, 3) = \begin{bmatrix} K_p^1 & K_i^1 & K_d^1 \\ K_p^2 & K_i^2 & K_d^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_p^m & K_i^m & K_d^m \end{bmatrix} \quad (11)$$

定义 1: 设矩阵 $P = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$; x_i 为粒子 i 的位置, 即 $x_i = [K_p^i, K_i^i, K_d^i]$; L_d, H_d 分别为粒子搜索空间的下限和上限, 则矩阵中所有粒子之间的相似度可以用粒子间相似熵 S_{ps} 来度量, S_{ps} 表达式见式 (12)。

$$S_{ps} = \sum_{1 \leq i \leq j}^m - \frac{\|x_i - x_j\|}{3\|L_d - H_d\|} \cdot \log \frac{\|x_i - x_j\|}{3\|L_d - H_d\|} \quad (12)$$

定义 2: 设 $\overline{K_p}, \overline{K_i}, \overline{K_d}$ 分别为粒子群矩阵 P 中列向量的平均值, 则可以用参数内熵 $S_{pie}^1, S_{pie}^2, \dots, S_{pie}^d$, $d \in \{1, 2, 3\}$, 分别表示粒子参数内部数值的分散性, 见式 (13)。

$$S_{pie}^d = \sum_{j=1}^m - \frac{(K_p^j - \overline{K_p})^2}{\sum_{i=1}^m (K_p^i - \overline{K_p})^2} \cdot \log \frac{(K_p^j - \overline{K_p})^2}{\sum_{i=1}^m (K_p^i - \overline{K_p})^2} \quad (13)$$

由于参数搜索空间和粒子初始化分散性对搜索结果产生的影响较大^[13], HOI-PSO 算法利用信息熵判断机制描述粒子间的相似度, 通过阈值限定, 对粒子群进行随机和定目标方式相结合的具目标性初始化。根据 H_∞ 理论初步选定参数搜索空间, 随机产生粒子, 计算粒子间 S_{ps}, S_{pie}^d , 分别判断其是否在粒子间相似熵的阈值 E_{ps} 和参数内熵的阈值 E_{pie}^d 范围内, 若在范围内, 则接受初始化粒子, 否则重新进行随机初始化, 直至满足要求。实验仿真结果表明: HOI-PSO 算法既能加快粒子群收敛速度和精度, 也能保证粒子小范围搜索空间的全局寻优能力。

3 HOI-PSO 算法整定大时滞 PID 参数

3.1 控制算法原理结构

PID 控制是对控制系统产生的偏差信号 $e(t)$ 进行比例、积分、微分运算后, 再将其进行线性组合构成控制量 $u(t)$, 从而实现对被控对象的控制作用。传统观念认为: PID 控制在大时滞过程中, 并不能表现出良好的控制性能。也有研究表明, PID 控制能否用于大时滞过程的关键在于 PID 参数整定。针对上述问题, 利用 HOI-PSO 算法的寻优能力, 在参数限定的范围内找出一组使控制性能指标最优的 PID 参数, 其控制器原理见图 2。PID 控制器的传递函数形式为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (14)$$

3.2 适应度函数选取

鉴于 PID 控制器设计是多维函数优化问题, 在满足系统鲁棒性能的基础上, 还需要系统的控制偏差趋

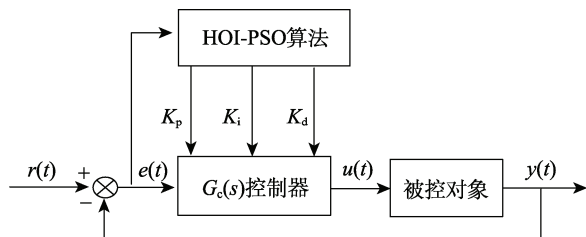


图2 基于 HOI-PSO 算法的 PID 控制系统

Fig.2 PID control system based on HOI-PSO algorithm

于零,并具有较快的响应速度,较小的超调量^[14],因此常采用能体现系统综合性能的指标:绝对偏差积分 (IAE)、时间偏差平方积分 (ITSE)、积分平方偏差 (ISE)、时间绝对偏差积分 (ITAE)。结合实际和各指标差异,文中 HOI-PSO 算法选取 ITAE 为适应度函数 (目标函数)。

$$f(x) = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (15)$$

将式 (15) 离散化处理,取足够大的积分上限 $t_{lim} = k \times \Delta t$, $k \in \mathbb{N}^+$, 保证系统响应输出 $y(t_{lim}) = y(\infty)$, 得到离散时间数组 $t(z)$, $z=0,1,\dots,k$; 则每个时间点对应偏差 $e(z)$, 只需要 Δt 足够小, 式 (15) 可近似为 $f(x) \approx \left(\sum_{z=1}^k t(z)|e(z)| \right) \Delta t$, 且 $t(z) = z \times \Delta t$ 。

3.3 HOI-PSO 算法整定大时滞 PID 参数流程

运用 HOI-PID 算法进行 PID 控制器参数整定的计算步骤如下所述。

1) 根据整定 K_p , K_i , K_d 参数问题, 初始化 HOI-PSO 算法参数: 种群大小为 $m=30$; 搜索空间维数为 $d=3$; 最大迭代次数 $t_{max}=100$; 搜索空间范围 L_d , H_d , 其中 $L_d = [K_p^{\min}, K_i^{\min}, K_d^{\min}]$, $H_d = [K_p^{\max}, K_i^{\max}, K_d^{\max}]$; 飞行速度 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}]$ 的范围为 $[v_{\min}, v_{\max}]$; 学习因子 $c_1=c_2=2$; 权重系数采用线性递减, 即: $\omega^t = 0.9 - 0.4t/t_{max}$; 粒子间相似熵的阈值 E_{ps} 和参数内熵的阈值 E_{PIE}^d 等。

2) 采用 H_{∞} 理论确定粒子群搜索空间范围, 通过信息熵办法即具目标性粒子初始化方法, 生成粒子 $x_i = [K_p^i, K_i^i, K_d^i]$, $1 \leq i \leq m$ 。

3) 计算粒子间信息熵 S_{ps} , 参数内熵 $S_{PIE}^d = [S_{PIE}^1, S_{PIE}^2, S_{PIE}^3]$, 判断是否在允许范围内, 如在允许范围内, 则跳转至步骤 4), 否则跳转至步骤 2)。

4) 根据式 (15) 适应度函数 $f(x)$, 计算粒子群中每个粒子的适应度值, 比较得到个体极值 p 和群体极值 g 。

5) 根据式 (1—2) 更新粒子的速度、位置, 计算更新后粒子的适应度值。

6) 终止条件判定, 若满足最大迭代次数、计算精度小于 ε 或最优解的最大停止步数 Δt , 转向步

骤 7)。

7) 判别是否需要再次寻优, 如需要则根据当前寻优结果进一步确定搜索空间范围, 跳转至步骤 1), 否则寻优终止。

4 仿真结果分析

4.1 实验仿真分析

基于 Matlab/Simulink 平台, 运用基于蚁群算法 (ACO) 的 PID 参数整定法 (ZN-ACO-PID)、基于 ZN 法的标准 PSO 算法的 PID 参数整定法 (ZN-PSO-PID)、基于 H_{∞} 理论的标准 PSO 的 PID 整定方法 (H-PSO-PID) 及文中所提出基于 HOI-PSO 算法的 PID 参数整定方法 (HOI-PSO-PID) 进行大时滞过程 PID 参数整定优化迭代过程仿真分析, 将整定后的 PID 参数应用于大时滞过程对象控制系统的 PID 控制器中。同时, 将以上算法与经验整定法 (ZN-PID)、基于内模结构的 PID 参数整定方法 (IMC-PID) 及基于 Smith 结构的 PID 参数整定方法 (Smith-PID) 进行仿真实验研究。设大时滞过程被控对象为: 一阶惯性加大时滞对象 (FOPTD) 为 $G_{p1}(s) = \frac{1}{4s+1}e^{-8s}$, 二阶惯性加大时滞对象 (SOPTD) 为 $G_{p2}(s) = \frac{1}{(10s+1)(5s+1)}e^{-8s}$, 高阶惯性加大时滞对象为 $G_{p3}(s) = \frac{1}{(8s+1)^5}e^{-10s}$, 分别对 3 个控制系统进行阶跃响应实验、抗干扰性能实验及鲁棒性实验仿真分析。ZN-ACO-PID, ZN-PSO-PID, H-PSO-PID 及 HOI-PSO-PID 优化对象 $G_{p1}(s)$, $G_{p2}(s)$ 和 $G_{p3}(s)$ 的整定优化过程曲线见图 3。

由图 3 可知, H-PSO 算法与标准 PSO 算法和 ACO 算法在整定 PID 参数过程中, 虽然能够减小搜索范围, 一定程度上避免了适应度值跃变, 且加快了收敛速度, 但其因为小范围内, 粒子的多样性无法得到满足, 因此容易陷入局部最优值。HOI-PSO 算法由于引入了信息熵来保证粒子的多样性, 因此其不仅收敛速度快, 且能够保持小范围内粒子的多样性, 能够保持与 ZN-PSO 算法、ACO 算法相近甚至更好的全局寻优能力, 不易陷入局部最优值。经以上 7 种方法整定优化后得到 PID 控制器参数见表 1。

根据上述 PID 参数, 利用 Matlab 对上述大时滞过程对象控制系统进行仿真实验, 分别得到一阶、二阶、高阶大时滞过程被控对象的单位阶跃响应仿真曲线见图 4—6。标称对象 $G_{p1}(s)$, $G_{p2}(s)$ 和 $G_{p3}(s)$ 在不同算法整定优化下的单位阶跃响应和负载扰动响应曲线见图 4a, 5a, 6a。对象 $G_{p1}(s)$ 和 $G_{p2}(s)$ 纯滞后时间常数增大 20%、 $G_{p3}(s)$ 纯滞后时间常数增大 60% 时的

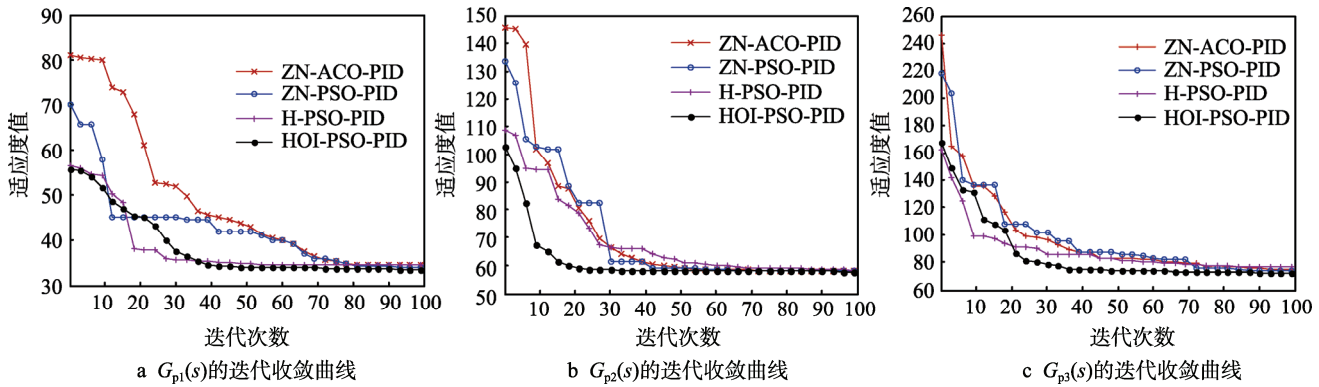


图 3 大时滞过程 PID 参数整定过程曲线
Fig.3 PID parameter tuning process curve for large time delay process

表 1 PID 控制器参数
Tab.1 PID controller parameters

整定方法	$G_{p1}(s)$			$G_{p2}(s)$			$G_{p3}(s)$		
	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d
HOI-PSO-PID	0.3634	0.0623	0.3625	0.8704	0.0495	3.5227	0.4659	0.0169	3.4956
ZN-PSO-PID	0.3631	0.0609	0.3410	0.8962	0.0508	3.6789	0.4301	0.0166	3.0419
ZN-ACO-PID	0.3910	0.0620	0.3269	0.8703	0.0496	3.1022	0.3597	0.0151	1.4159
H-PSO-PID	0.2817	0.0543	0.0761	0.9145	0.0515	3.5227	0.4759	0.0161	4.6891
ZN-PID	0.5882	0.0334	2.3529	1.3731	0.0569	7.5312	0.9693	0.0150	14.2208
IMC-PID	0.5882	0.0735	1.1765	1.1059	0.0598	4.2677	0.8373	0.0208	7.7985
Smith-PID	0.4637	0.0735	0.3910	0.8533	0.0527	1.7834	0.5974	0.0179	2.6009

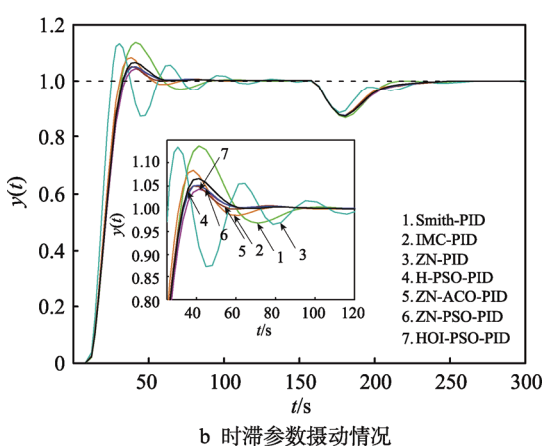
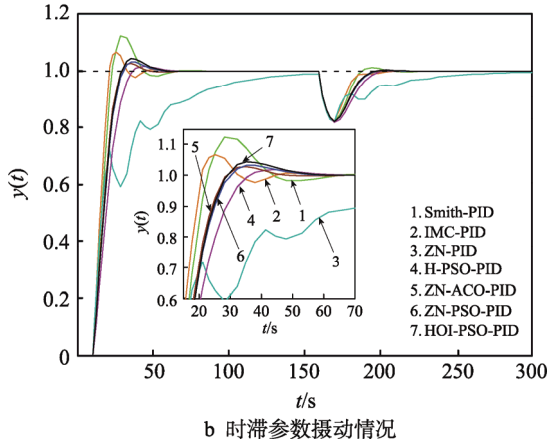
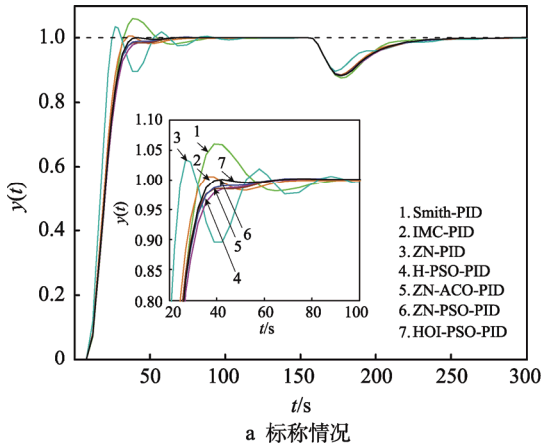
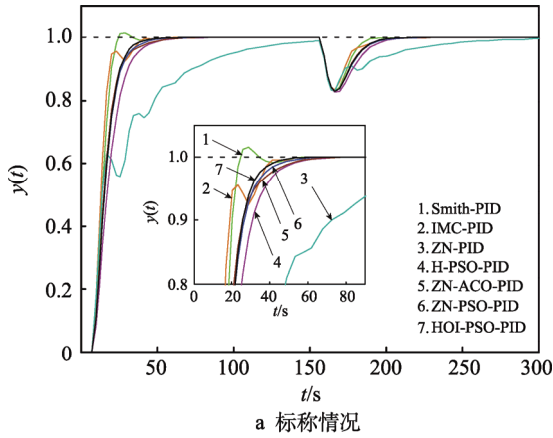


图 4 $G_{p1}(s)$ 单位阶跃响应曲线
Fig.4 Unit step response curve of $G_{p1}(s)$

图 5 $G_{p2}(s)$ 单位阶跃响应曲线
Fig.5 Unit step response curve of $G_{p2}(s)$

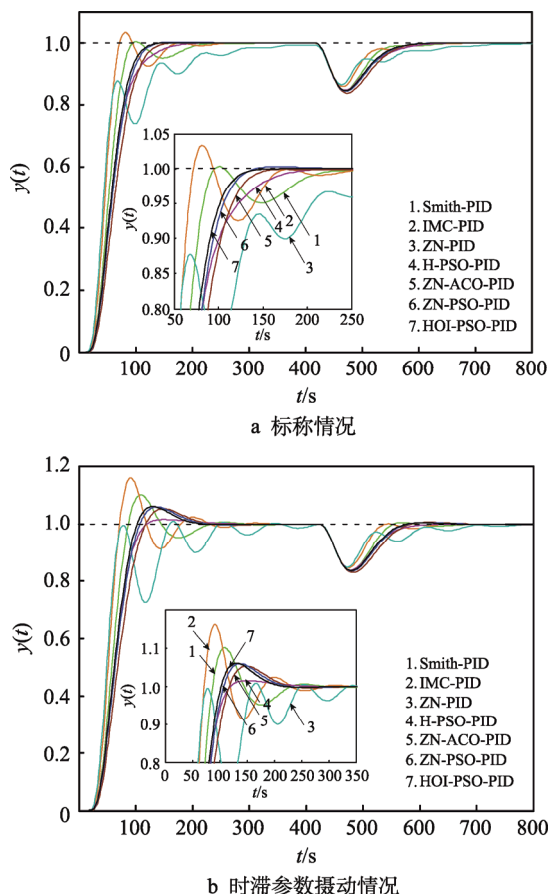


图6 $G_{p3}(s)$ 单位阶跃响应曲线
Fig.6 Unit step response curve of $G_{p3}(s)$

单位阶跃响应曲线和负载扰动响应曲线分别见图4b, 5b, 6b。图4、图5负载扰动在 $t=200$ s时加入, 图6负载扰动在 $t=400$ s时加入, 扰动大小为20%的单位阶跃信号。

由图4a, 5a, 6a的动态响应曲线可以看出, 相比于ZN-ACO-PID, ZN-PSO-PID, H-PSO-PID算法, HOI-PSO-PID算法整定的PID参数控制性能较好, 调节时间缩短、响应速度加快且不产生超调量, 抗干扰能力较强, 能够迅速地回到设定值, 控制效果良好。与传统的PID整定方法ZN-PID, IMC-PID, Smith-PID

相比, 通过HOI-PSO算法整定的PID参数, 使得大时滞过程对象控制系统闭环控制性能在响应速度和抗干扰能力两方面均得到了明显的改善, 同时避免了复杂控制结构的设计且摆脱了参数整定过程中对人工经验的依赖。当参数发生摄动时, 如图4b, 5b, 6b所示, HOI-PSO算法整定的PID参数相比于ZN-PID, IMC-PID, Smith-PID在调节时间, 响应速度以及鲁棒性方面依旧存在较大的优势, 相比于ZN-ACO, ZN-PSO, H-PSO, 经HOI-PSO算法整定的PID参数虽然存在一些超调, 但其调节时间短, 响应速度较快, 表现出良好的鲁棒性能。可见HOI-PSO算法不仅能够提高收敛速度、同时能够保持与ZN-PSO算法相同甚至更好的寻优能力。不仅避免了参数寻优过程的盲目性, 而且在减小搜索空间的情况下, 保证了粒子的多样性, 有效地克服粒子群容易陷入局部最优值的问题, 确保了算法的全局寻优能力。文中将提出的算法应用于大时滞过程PID参数整定这一控制问题上, 闭环控制性能良好, 避免了PID参数整定过程中复杂控制结构的设计及对人工经验的依赖, 证明了该算法的有效性。

4.2 实际应用效果

文中所述基于 H_∞ 理论的信息熵PSO算法整定大时滞过程PID参数控制策略已成功应用于某造纸厂长网纸机抄纸过程纸张定量控制系统, 该纸机长期生产 150 g/m^2 包装纸。由于纸张定量检测点(定量仪处)与执行机构(定量阀)之间距离较长, 因此纸机纵向定量控制是一个大时滞过程, 控制难度大, 其工艺流程见图7^[15-16]。

经过现场调试, 在工况稳定后, 得到某一时间段的定量监控画面见图8。产品合格标准中定量波动范围为 $\pm 3\text{ g/m}^2$ 。投运自动控制系统后, 各项控制指标都基本上符合要求, 纸张定量波动范围则被控制在 $-2\sim 1\text{ g/m}^2$ 内, 偏差较小, 明显提高了产品质量, 显著提升了产品的经济效益。证明了该算法切实有效, 具有一定的实用价值。

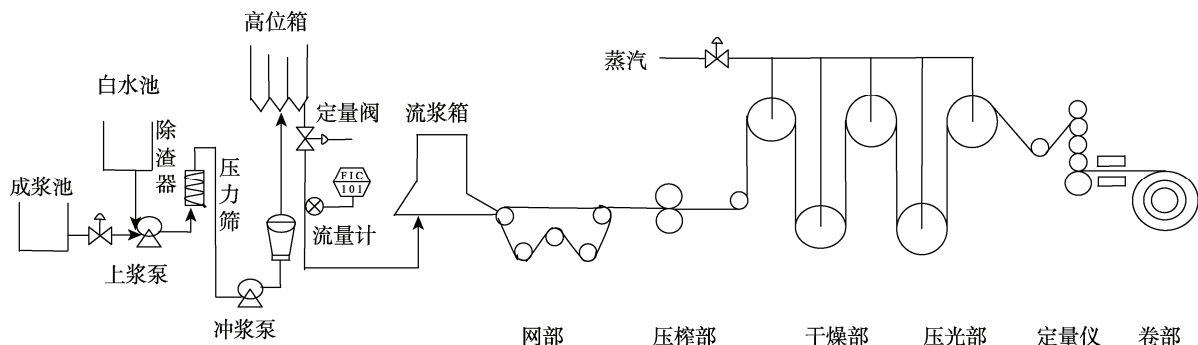


图7 长网纸机抄纸过程的工艺流程
Fig.7 Technological process of fourdrinier paper making process

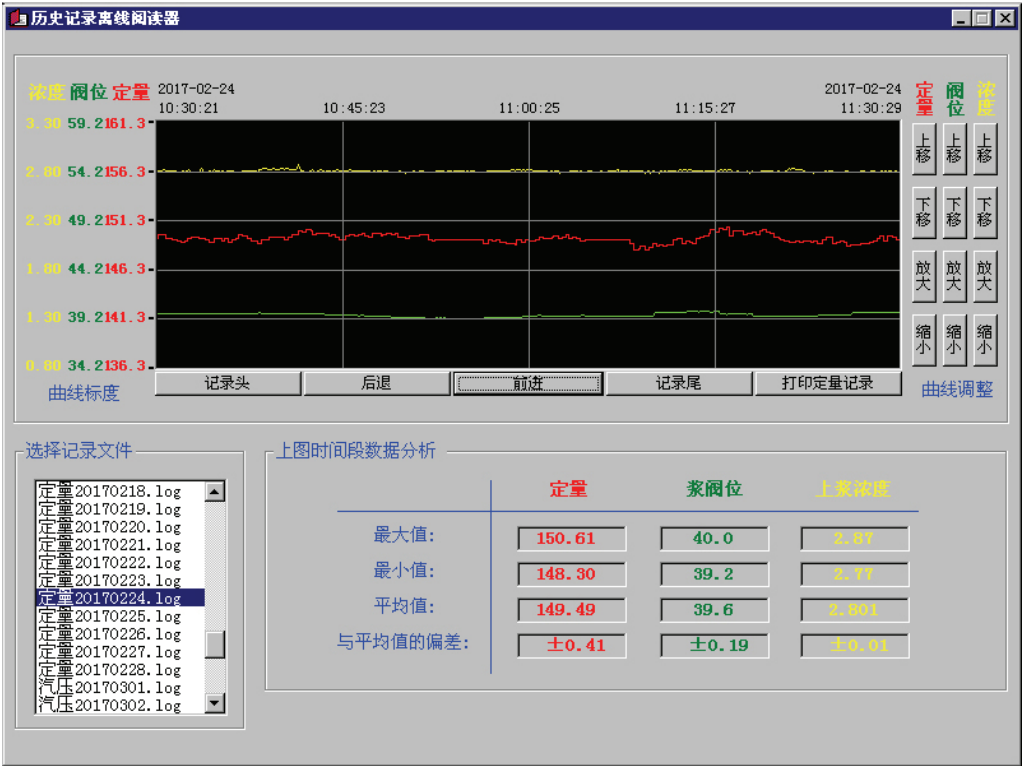


图 8 稳定工况下纵向定量的变化曲线
Fig.8 Curves of quantitative longitudinal change under stable condition

5 结语

利用 H_{∞} 理论缩小 PSO 算法整定 PID 参数问题的搜索空间, 融合信息熵概念保证粒子在小范围内的多样性, 因此 HOI-PSO 算法不仅能够避免大空间搜索的盲目性和粒子适应度值的跃变, 提高收敛速度, 而且能够保持与大范围搜索空间内粒子的全局寻优能力, 保证了寻优结果良好。通过对不同大时滞对象进行迭代曲线分析, 证实了算法的有效性。将该控制算法应用于大时滞对象过程控制系统, 使得闭环系统控制性能良好, 同时研究了过程模型参数摄动时, 系统的鲁棒性和抗干扰性。在纸张定量控制回路的应用中, 该控制算法显著地提高了纸张定量的稳定性, 具有一定的理论指导意义。

参考文献:

[1] 喻寿益, 许新. 大时滞系统时间协调参数调整控制策略[J]. 控制工程, 2009, 16(2): 148—150.
YU Shou-yi, XU Xin. Time Correspondence and Parameter Adjustment Control Strategy of Long Time Delay Systems[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(2): 148—150.

[2] 郭瑞青, 程启明, 杜许峰, 等. 大时滞过程的控制方法[J]. 上海电力学院学报, 2008, 24(3): 248—253.
GUO Rui-qing, CHENG Qi-ming, DU XU-feng, et al. The Overview of the Control Methods on Large Time

Delay Systems[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2008, 24(3): 248—253.

[3] 金以慧, 王诗宓, 王桂增. 过程控制的发展与展望[J]. 控制理论与应用, 1997(2): 145—151.
JIN Yi-hui, WANG Shi-mi, WANG Gui-zeng. Developments and Prospects of Process Control[J]. Control Theory and Applications, 1997(2): 145—151.

[4] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347—354.
WANG Wei, ZHANG Jin-tao, CHAI Tian-you. A Survey of Advanced PID Parameter Tuning Methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 347—354.

[5] KNOAPE C. PID control[J]. IEEE Control System Magazine, 2006, 26(1): 30—31.

[6] 张辰璐, 彭冬亮, 方韬, 等. 基于 GA-PSO 的天基预警系统资源调度方法[J]. 信息与控制, 2016, 45(2): 199—210.
ZHANG Chen-lu, PENG Dong-liang, FANG Tao, et al. Resource Scheduling Method for Space-Based Early Warning System Based on GA-PSO Algorithm[J]. Information and Control, 2016, 45(2): 199—210.

[7] 杜继永, 张凤鸣, 李建文, 等. 一种具有初始化功能的自适应惯性权重粒子群算法[J]. 信息与控制, 2012, 41(2): 165—169.
DU Ji-yong, ZHANG Feng-ming, LI Jian-wen, et al. A Particle Swarm Optimization Algorithm with Initialized Adaptive Inertia Weights[J]. Information and Control, 2012, 41(2): 165—169.

[8] 朱海梅, 吴永萍. 一种高速收敛粒子群优化算法[J].

- 控制与决策, 2010, 25(1): 20—24.
ZHU Hai-mei, WU Yong-ping. A PSO Algorithm with High Speed Convergence[J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 20—24.
- [9] 高宪文, 张大勇. 熵极大自适应变异粒子群优化算法及其应用[C]// 2007 中国控制与决策学术年会论文集, 2007: 4.
GAO Xian-wen, ZHANG Da-yong. Algorithms and Applications of Particle Swarm Optimization with Adaptive Mutation Based on Entropy Maximization[C]// Proceedings of 2007 Chinese Control and Decision Conference, 2007: 4.
- [10] MARINI F, WALCZAK B. Particle Swarm Optimization (PSO)[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 149: 153—165.
- [11] 姜建国, 田旻, 王向前, 等. 采用扰动加速因子的自适应粒子群优化算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(4): 74—80.
JIANG Jian-guo, TIAN Min, WANG Xiang-qian, et al. Adaptive Particle Swarm Optimization via Disturbing Acceleration Coefficients[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4): 74—80.
- [12] 曾强龙, 徐伟民. 开卷系统速度和张力的鲁棒控制[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 75—79.
ZENG Qiang-long, XU Wei-min. Robust Control of Velocity and Tension of Unwinding System[J]. Packaging Engineering 2012, 33(1): 75—79.
- [13] 刘明, 华亮, 周俊, 等. 基于 OIPSO 算法的环境最优动力定位控制器设计[J]. 船舶工程, 2105, 37(6): 59—62.
LIU Ming, HUA Liang, ZHOU Jun, et al. Design of Weather Optimal Dynamic Positioning Controller Based on OIPSO Algorithm[J]. Ship Engineering, 2105, 37(6): 59—62.
- [14] 姜增如. 基于遗传算法的智能控制创新性实验研究[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(07): 32—35.
JIANG Zeng-ru. Research of Innovative Experiments Based on Intelligent Control of Genetic Arithmetic[J]. Experimental Technology and Management, 2012, 29(07): 32—35.
- [15] 单文娟, 汤伟, 王孟效, 等. 基于分数阶 PID 的纸张定量双自由度 Smith 预估控制[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 143—147.
SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao, et al. Two-degree-of-freedom Smith Predictor Based on Fractional Order PID Controller in Paper Basis Weight [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 143—147.
- [16] 尤斌, 彭晗, 胡慕伊, 等. 基于 RBF 神经网络的纸张定量水分解耦控制系统设计[J]. 中国造纸学报, 2012, 27(4): 39—42.
YOU Bin, PENG Han, HU Mu-yi, et al. Paper Basis Weight and Moisture Decoupled Control Based on RBF Neural Network[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2012, 27(4): 39—42.