文章编号:1001 -9081(2010)06 -1547 -03

利用改进粒子群算法整定 PID 参数

肖理庆[1],邵晓根[1],石天明[2],张　亮[2]
(1. 徐州工程学院 信电工程学院,江苏 徐州 221008; 2. 中国石油大学 信息与控制工程学院,山东 东营 257061)
(xiaoliqing1981@163.com)

摘　要:PID 控制器的性能取决于其控制参数的组合,针对其参数的整定与优化问题,提出了一种改进的粒子群算法,该算法将区间算法与轮盘赌选择引入种群微粒位置的初始化操作。仿真实验表明,新算法能有效克服早熟收敛现象,降低随机性初始种群的影响,提高算法收敛精度。

关键词:PID 控制器;粒子群算法;区间算法;轮盘赌选择;早熟收敛
中图分类号: TP273.2　　**文献标志码**:A

Tuning PID parameters with improved particle swarm optimization

XIAO Li-qing[1], SHAO Xiao-gen[1], SHI Tian-ming[2], ZHANG Liang[2]
(1. *College of Information and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou Jiangxu* 221008, *China*;
2. *College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong* 257061, *China*)

Abstract: The performance of PID controller depends on the combination of the control parameters. An improved particle swarm optimization was proposed for tuning and optimizing PID parameters, by applying interval algorithm and roulette wheel selection to the initialization of particle location. The simulation and experimental results show that, the proposed algorithm can overcome premature phenomena, reduce the influence of random initial population, and improve the convergence precision, which means a good application prospect.

Key words: PID controller; Particle Swarm Optimization (PSO); interval algorithm; roulette wheel selection; premature convergence

0　引言

PID 控制原理简单、鲁棒性好、可靠性高,是迄今为止最通用的控制方法,其控制效果取决于控制器参数的取值,目前 PID 控制器的参数整定与优化已成为一个重要的研究课题。近几年来,基于群智能的随机优化算法粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)[1-3]作为一种全局优化算法,得到了越来越广泛的应用。但单纯粒子群算法存在早熟收敛以及局部搜索能力不足的问题,实际应用中需对算法进行改进。

文献[4]借鉴遗传算法的杂交机制,并采用惯性权值非线性递减策略,用以提高算法的收敛速度和粒子的搜索能力,相比传统粒子群算法与遗传算法具有更好的优化效果;文献[5]将细菌觅食算法与粒子群算法相结合,仿真实验结果表明基于该算法的分数阶 PID 控制不仅无超调量、收敛速度快,而且鲁棒性强、收敛精度高,可用于控制不同的对象和过程;文献[6]引入粒子群聚合度和变异的思想,能很好避免早熟,提高粒子全局搜索能力;文献[7]将生物学中吸引排斥思想引入粒子群算法,充分利用粒子间的相互影响,从而维持了群体的多样性,增强了粒子跳出局部最优解的能力。上述改进算法从不同方面对粒子群算法进行了改善,但均未对算法初始化种群的设定进行研究。

本文针对 PID 参数整定与优化问题的特点,提出一种改进算法,将区间算法[8]与轮盘赌选择引入粒子群算法种群各微粒位置的初始化操作中,提高了算法的稳定性与收敛精度。

1　改进粒子群算法

1.1　粒子群算法简介

设粒子群算法种群规模为 n,维数为 m,当粒子群算法进行到第 g 次迭代时,$\boldsymbol{X}_i = (x_i^1, x_i^2, \cdots, x_i^m)$ 为第 $i(i = 1,2,\cdots,n)$ 个粒子位置,其速度矢量为 $\boldsymbol{V}_i = (v_i^1, v_i^2, \cdots, v_i^m)$,算法迄今搜索到的个体最优值为 $\boldsymbol{pbest}_i = (\boldsymbol{pbest}_i^1, \boldsymbol{pbest}_i^2, \cdots, \boldsymbol{pbest}_i^m)$,对应 $\boldsymbol{gbest}_g = (\boldsymbol{gbest}^1, \boldsymbol{gbest}^2, \cdots, \boldsymbol{gbest}^m)$ 为全局最优值。粒子将按式(1)改变自己的速度和位置:

$$\begin{cases} \boldsymbol{V}_i = \omega \times \boldsymbol{V}_i + c_1 \times rand1 \times (\boldsymbol{pbest}_i - \boldsymbol{X}_i) + \\ \quad c_2 \times rand2 \times (\boldsymbol{gbest}_g - \boldsymbol{X}_i) \\ \boldsymbol{X}_i = \boldsymbol{X}_i + \boldsymbol{V}_i \end{cases} \tag{1}$$

其中:ω 称为惯性权重;c_1 与 c_2 为常数,称为学习因子,一般取 $c_1 = c_2 = 2$;$rand1$ 与 $rand2$ 是(0,1)范围里均匀分布的随机数。

惯性权重 ω 对粒子群算法优化性能有很大的影响,较大的 ω 值有利于跳出局部极值,而较小的 ω 有利于算法收敛。本文采用如下公式自动更新 ω:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{iteration}{max\_iteration} \times (\omega_{max} - \omega_{min}) \tag{2}$$

其中:$max\_iteration$ 是最大迭代次数,$iteration$ 是当前迭代次

收稿日期:2009 -12 -15;**修回日期**:2010 -02 -04。
基金项目:江苏省高校自然科学研究项目(09KJD120005);徐州工程学院校科研基金资助项目(XKY2007233)。
作者简介:肖理庆(1981 -),男,山东青岛人,讲师,硕士,主要研究方向:智能控制、无损检测; 邵晓根(1963 -),男,江苏徐州人,副教授,主要研究方向:智能控制; 石天明(1962 -),男,上海人,教授,博士,主要研究方向:无损检测; 张亮(1981 -),男,山东东营人,硕士,主要研究方向:无损检测。

数[9]。

1.2 区间算法简介

区间算法思想安全可靠，但区间检验条件复杂。而文献[10]发展了一类胞腔排除法中的检验条件则较为简单并易于实现，采用了二阶区间扩展形式：

$$F(X) = f(m(X)) + \frac{\partial f^{T}(X)}{\partial X}(X - m(X)) + \frac{1}{2}(X - m(X))^{T}\frac{\partial f^{2}(X)}{\partial X \partial X^{T}}(X - m(X)) \quad (3)$$

由此给出了一个简单的区间检验条件：假设 $f'(x)$ 满足 Lipschitz 条件，即

$$\| f'(x) - f'(y) \| \leqslant c \| x - y \| ; \forall x, y \in S \quad (4)$$

设 $X \subset S$ 为任一区间，有以下引理：

设 $f(x)$ 二阶连续可微并满足式(4)，f_0 为 f 在 S 内某点的适应值，则当 X 满足式(5)时，X 内一定不含 f 的整体极小点。

$$f_0 < f(m(X)) - \frac{1}{8}c \| \omega(X) \|^{2} \quad (5)$$

1.3 改进算法理论分析与算法流程

在粒子群算法中，种群的设定对整个算法的运行性能具有基础性的决定作用。由于很难判断最优解在可行解空间中的分布情况，种群各微粒的初始位置一般是随机产生的。而PID控制中需整定的参数只有3个，属于低维优化问题。子区间的个数与区间剖分次数满足以下关系：子区间个数 $= 8^{\text{区间剖分次数}}$，当区间剖分次数取1或2时，子区间个数较少，区间算法计算量对应较小，而将区间算法与轮盘赌选择引入算法种群各微粒位置的初始化操作中，可将不存在极值点的区间排除，相当于为种群初始化设定提供了解空间的先验知识，从而可有效提高算法的稳定性与收敛精度。

改进粒子群算法具体流程如下：

1）初始化。确定变量范围，设置改进算法区间剖分次数 N、种群数目、最大迭代次数、系统允许误差、学习因子、最大惯性权重、最小惯性权重等相关参数。

2）根据设置的区间剖分次数生成子区间，按照式(5)利用区间算法将不存在极值点的区间排除，保留可能存在极值点的区间。

3）利用轮盘赌选择生成初始种群。具体操作为取可能存在极值点的区间中点并计算其适应度值，将轮盘分成不同的扇区，扇区被选中的概率与其适应度大小成正比。同时随机产生粒子速度矢量。

4）评价种群中所有微粒，将当前各微粒的位置和目标值存储于各微粒的 ***pbest*** 中，将所有的 ***pbest*** 中目标值最优的个体的位置和目标值存储于 ***gbest*** 中，判断是否满足算法结束条件。

5）按式(1)～(2)更新各个微粒的速度和位置。

6）评价种群中所有微粒并比较种群中每个微粒当前目标值与其 ***pbest*** 的目标值。若当前目标值更优，则用微粒的当前位置和目标值更新其 ***pbest***。

7）比较当前所有 ***pbest*** 和 ***gbest*** 的目标值，更新 ***gbest***。

8）判断是否满足算法终止条件。若满足，算法结束并返回结果，否则跳转到5)，对种群的各个微粒进行重新评价并循环计算。

2 仿真实验与分析

为了验证算法的性能，现将算法应用于PID控制器参数优化设计中，实验环境为 Pentium M 1.60 GHz CPU，760 MB RAM。选取被控对象数学模型为二阶传递函数 $G(s) = \frac{400}{s^2 + 50s}$，仿真时间为0.1 s，输入信号为单位阶跃信号，并采用下式作为参数选取的最优指标：

$$J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) \mathrm{d}t + w_3 \times t_r \quad (6)$$

其中：$e(t)$ 为系统误差，$u(t)$ 为控制器输出，t_r 为上升时间，w_1、w_2、w_3 为权值。

为了避免超调，采用了惩罚功能，即一旦系统产生超调，将超调量作为最优指标的一项，此时最优指标为：

如果 $ey(t) < 0$，则

$$J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |ey(t)|) \mathrm{d}t + w_3 t_r \quad (7)$$

其中：w_4 为权值，且满足如下关系 $w_4 \gg w_1$，$ey(t) = y_{out}(t) - y_{out}(t-1)$，$y_{out}(t)$ 为被控对象输出[11]。

改进粒子群算法中微粒个数取20，每个微粒中包含3个变量，学习因子取2，最大惯性权重取0.9，最小惯性权重取0.1，最大迭代次数为200，遗传算法中交叉概率 $P_c = 0.9$，变异概率 $P_m = 0.036$，参数 k_p 取值范围为[1,50]，k_i、k_d 取值范围为[0.1,5]，取 $w_1 = 1$、$w_2 = 0.001$、$w_3 = 2.0$、$w_4 = 100$，区间剖分次数取1。

为了得到一个具有统计意义的结果，对上述参数设置的4种不同算法各运行10次，取其平均值，仿真实验结果如表1、图1～2所示。表1中：t_s、σ、$D(J)$ 分别为调节时间、超调量、J 的方差，算法1～4分别表示单纯遗传算法、单纯粒子群算法、文献[12]算法，以及本文提出的改进算法。

表1 不同算法各个参数统计结果比较

算法	k_p	k_i	k_d	J	t_s	σ/%	$D(J)$
算法1	40.6537	0.4027	1.9626	22.9870	0.04582	0.3009	7×10^{-2}
算法2	41.3875	0.4067	2.0357	22.8858	0.04368	0.2904	3×10^{-2}
算法3	41.1597	0.4049	1.9878	22.6529	0.04260	0.2589	2×10^{-2}
算法4	48.9720	0.4475	1.8132	22.2039	0.03930	0.1580	4×10^{-4}

表2 算法4不同区间剖分次数统计结果比较

区间剖分次数	k_p	k_i	k_d	J	t_s	σ/%	$D(J)$
1	48.9720	0.4475	1.8132	22.2039	0.0393	0.1580	4×10^{-4}
2	48.9962	0.4488	1.8155	22.1658	0.0306	0.1272	2×10^{-5}

由表 1、图 1 ~ 2 可知,本文提出的改进算法相比单纯遗传算法、单纯粒子群算法及其改进算法效果更佳,提高了算法的收敛精度,降低了初始种群中各微粒位置随机性的影响,提高了系统 PID 控制阶跃响应动态性能指标调节时间和超调量。

现将区间剖分次数改为 2,其他参数设置不变,仿真实验结果如表 2、图 3 ~ 4 所示。

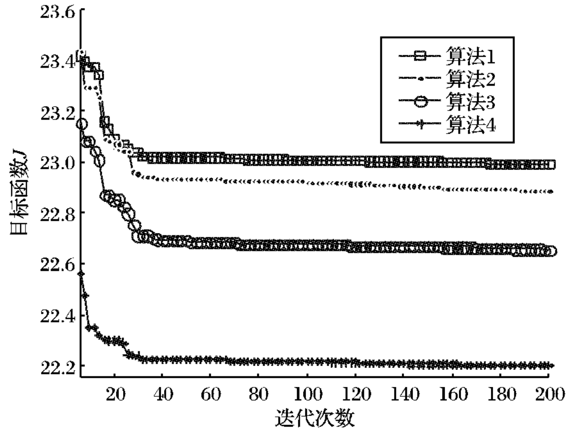

图 1　4 种算法目标函数平均收敛曲线

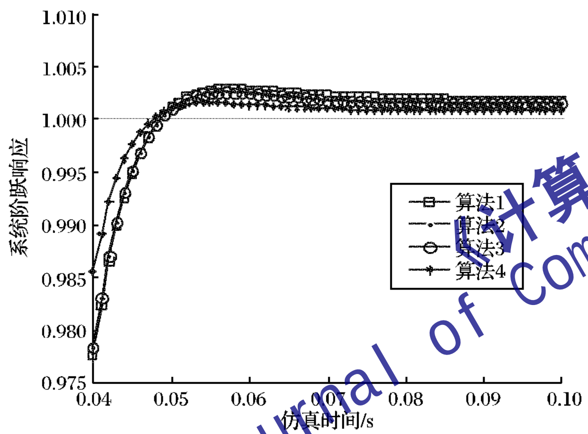

图 2　4 种算法 PID 控制阶跃响应曲线

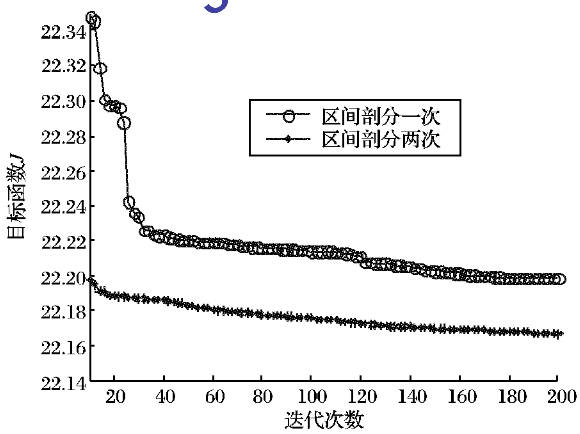

图 3　算法 4 不同剖分次数目标函数平均收敛曲线

由表 2、图 3、4 可知,增加区间剖分次数有利于算法跳出局部最优,进一步提高算法的收敛精度,降低初始种群随机性的影响,提高系统 PID 控制阶跃响应动态性能指标调节时间和超调量。但随着剖分次数的增加,区间算法计算量增加,同时为了不漏掉全局极值点,需增加种群规模,而种群规模的增加导致微粒评价计算量的增加,从而使算法效率降低,一般情况下建议区间剖分次数取 1 或 2。

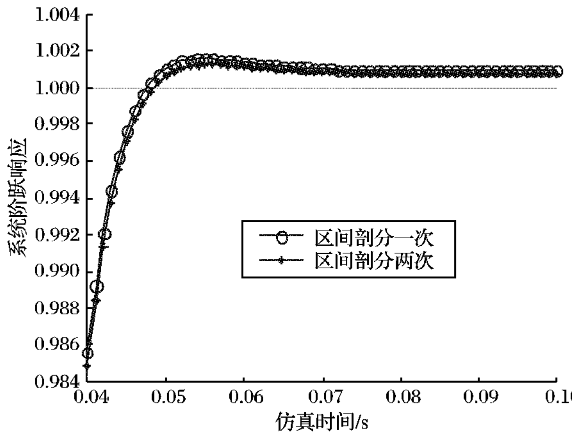

图 4　算法 4 不同剖分次数 PID 控制阶跃响应曲线

3　结语

本文针对 PID 参数整定与优化问题的特点,提出一种改进算法,将区间算法与轮盘赌选择引入粒子群算法种群各微粒位置的初始化操作中。仿真实验表明,改进算法具有以下优点:

1)有效克服了早熟收敛现象,提高了算法收敛精度;

2)降低了随机性初始种群对算法输出结果的影响,提高了算法的稳定性;

3)提高了系统 PID 控制阶跃响应的性能指标调节时间与超调量。

参考文献:

[1] 王凌,刘波. 微粒群优化与调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社,2008: 1 - 10.

[2] ABIDO M A. Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 406 - 413.

[3] ADLY A A, ABD-EL-HAFIZ S K. Utilizing particle swarm optimization in the field computation of non-linear magnetic media [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2003, 18(3): 202 - 209.

[4] 罗春松,张英杰,王锦锟. 改进粒子群算法整定 PID 参数研究[J]. 计算机工程与应用,2009,45(17): 225 - 227.

[5] 胡海波,黄友锐. 混合粒子群算法优化分数阶 PID 控制参数研究[J]. 计算机应用,2009,29(9): 2483 - 2486.

[6] 李立礼,王强,王晓霄. 改进粒子群优化算法在 PID 参数整定中的研究[J]. 计算机工程与应用,2009,45(25): 240 - 245.

[7] 赵鹏军,刘三阳,李超. 基于吸引排斥机制的粒子群优化算法[J]. 计算机应用,2009,29(2): 542 - 544.

[8] 胡承毅,徐山鹰,杨晓光. 区间算法简介[J]. 系统工程理论与实践,2003,23(4): 59 - 62.

[9] 吴启迪,汪镭. 智能微粒群算法研究及应用[M]. 南京: 教育出版社,2005: 11 - 44.

[10] XU Z B, ZHANG J S, WANG W. A cell exclusion algorithm for determining all the solutions of a nonlinear system of equation [J]. Applied Mathematics and Computation, 1996, 80(2): 181 - 208.

[11] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社,2004, 130 - 140.

[12] 陈贵敏,贾建援,韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报,2006,40(1): 53 - 56.