

## 基于粒子群算法的 PID 参数自整定\*

栾丽君<sup>1</sup>, 谭立静<sup>1</sup>, 牛 奔<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 辽宁工程技术大学, 机械工程学院, 阜新, 辽宁 123000

<sup>2</sup> 中科院沈阳自动化研究所, 先进制造试验室, 沈阳, 辽宁 1100016

email:tan\_lijing@163.com

**摘 要:** PID 控制器的参数整定, 从优化的角度来说就是在  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  3 个参数空间中寻找最优值, 使系统的控制性能达到最优。粒子群优化(PSO)算法是一种新兴的演化算法, 该算法与传统方法相比有着较高的收敛速度和计算精度, 可以高效、并行在搜索空间寻找到全局最优解。就此, 本文提出了一种基于粒子群算法的 PID 控制参数自整定方法。在实验仿真中与基于遗传算法的 PID 参数整定方法进行了比较, 结果表明, 本算法优于基本遗传算法, 可以快速、有效实现 PID 控制参数的自整定。

**关键词:** 粒子群 PID 控制 群体智能

### 1. 引言

在现代工业控制领域, PID 控制器由于其结构简单、鲁棒性好、可靠性高等优点得到了广泛应用。PID 控制器的控制性能与控制器参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  的优化整定直接相关。在工业控制过程中多数的控制对象是高阶、时滞、非线性的, 所以对 PID 控制器的参数整定是较为困难的。传统的 PID 参数优化方法有: 稳定边界法(临界比例度法)、衰减曲线法、动态特性法和 Ziegler Nichols 经验公式(ZN 公式法)等<sup>[1]</sup>。

这些算法过程比较繁琐、难以实现参数的最优整定、容易产生震荡和大超调。为了解决这一问题, 近几年来, 提出了许多基于人工智能技术的 PID 参数整定方法, 如神经网络、模糊系统、模糊神经网络等<sup>[2, 3]</sup>。进化计算技术, 如遗传算法, 由于其较强的全局优化能力在 PID 控制器参数优化设计中也得到了广泛的应用<sup>[4, 5]</sup>。与传统的方法相比, 遗传算法取得了一定的效果, 但还是存在一些问题, 如编码及解码过程需要大量 CPU 时间, 算法易早熟收敛陷入局部最优, 往往不能同时满足控制系统的速度和精度的要求等。

1995 年 Kennedy 和 Eberhart 等人<sup>[6]</sup>提出了一种新的进化计算技术——粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。PSO 算法由于其思想简单、程序易实现、需要调整的参数较少已被广泛应用于科学计算与工程应用领域。但应用于 PID 控制器的参数设计并不多见。本文采用 PSO 算法对 PID 控制器的参数进行在线自整定, 并与基于实数编码的遗传算法和基于二进制编码的遗传算法进行了仿真比较。实践证明: 该算法操作方便、收敛速度快、优化精度高、不易陷入局部最优值等优点。

### 2. 粒子群优化算法

\* 基金项目: 辽宁省教育厅资助项目 20081218

PSO算法最初来源于对鸟群和鱼群等动物群体运动行为的研究。它是一种基于群体智能方法的演化计算技术,适合于各类全局优化问题。与其它演化算法类似,PSO算法也是基于群体的,不同的是它没有其它演化算法中的演化算子(如遗传算法中的交叉、变异算子),而是将群体中的每一个个体看成是一种没有质量、没有体积的微粒(点)。每个微粒在搜索空间以一定的速度飞行。每个微粒的速度根据自身的经验与群体的经验进行调节,表现为每个粒子均向自身较好位置和群体中最好微粒的位置靠近。每个微粒的位置即可视为问题空间的一个潜在解。

假设在一个D维搜索空间中,有S个微粒,每个粒子的位置和速度分别表示为: $X_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{iD})$ ,  $V_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{iD})$ ,  $i=1,2,\dots,S$ 。每个粒子迄今为止经历的最好位置记为  $P_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{iD})$ , 整个粒子群中迄今为止最好的位置记为  $P_g=(P_{g1},P_{g2},\dots,P_{gD})$ 。

那么在每一次迭代计算中,每个粒子根据如下公式更新自己的速度和位置:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + c_2 \text{rand}() (p_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

其中,  $\text{rand}()$  为[0, 1]范围内变化的随机函数,  $c_1$  和  $c_2$  为正实数,称作加速因子;  $w$  为惯性权重, Shi等人<sup>[7]</sup>指出该系数从一个最大值  $w_{\max}$  随着迭代过程线性递减到一个最小值  $w_{\min}$  可使算法在迭代初期探索较大的区域,较快的定位最优解的大致位置,而在迭代后期随着  $w$  的逐渐减小算法可以实现精细的局部搜索。此外,微粒的速度通常被限定在一个最大速度范围类。这由用户自己确定。

公式(1)由三部分组成,第1部分是粒子先前的速度,表明了粒子目前的状态;第2部分为“认知(Cognition)”部分,表示微粒自身的思考;第3部分为“社会(Social)”部分,表示微粒间的信息共享与相互合作。这3部分共同决定了粒子的空间搜索能力。

### 3. 基于 PSO 的 PID 参数自整定方法

PID控制器是通过调整3个参数来使系统的性能达到给定的要求。从优化的角度来说就是在这3个变量的参数空间中寻找最优的值使系统的控制性能达到最优。本节给出了如果应用PSO实现PID控制器参数的整定。我们将这种方法称之为PSO-PID。PSO-PID控制系统结构如图1所示。

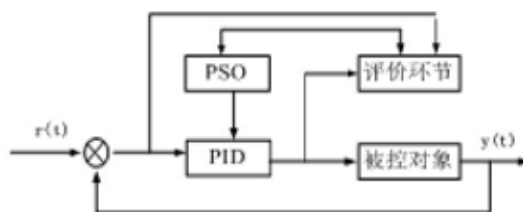


图1 PSO-PID控制系统结构

在这种控制方法中, PSO算法首先进行离线学习, 然后再接入到控制系统中。基于PSO算法的PID参数优化整定方法关键问题是: 如何解决参数的编码及适应度函数的选择, 下面分别论述之。

#### 3.1 参数的编码

令种群P中的粒子数为S, 每个粒子的位置矢量由PID控制器的三个控制参数组成, 即粒子位置矢量的维D=3。该种群可以用一个  $S \times D$  的矩阵来表示

$$P(S, D) = \begin{bmatrix} K_p^1 & K_i^1 & K_d^1 \\ K_p^2 & K_i^2 & K_d^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ K_p^S & K_i^S & K_d^S \end{bmatrix} \quad (3)$$

考虑到控制系统的多样性，由用户决定各个参数的取值范围，初始种群可以在允许的取值范围内随机产生。

### 3.2 适应度函数选择

PSO算法在搜索进化过程中仅用适应度值来评价个体或解的优劣，并作为以后粒子速度和位置更新的依据，使得初始解逐步向最优解进化。

为了获取满意的过渡过程动态特性，采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数<sup>[8]</sup>。为了防止控制能量过大，在目标函数中加入控制输入的平方项。选用下式作为目标函数

$$F = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt \quad (4)$$

其中  $e(t)$  为系统误差； $u(t)$  为控制器输出， $w_1$  和  $w_2$  为权值。

为了避免超调，采用了惩罚控制，即一旦产生超调，将超调量作为最优指标的一项，此时最优指标为

if  $e(t) < 0$  ,

$$F = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_3 |e(t)|) dt \quad (5)$$

式中， $w_3$  为权值，且  $w_3 \gg w_1$ 。通常  $w_1 = 0.999$ ,  $w_2 = 0.001$ ,  $w_3 = 100$ 。

### 3.3 算法流程

参数的编码和适应度函数的确定后用于PID参数整定的PSO算法如下：

- (1) 初始化每个粒子的位置和速度；
- (2) 根据式(5)计算每个粒子的适应度；
- (3) 对每个粒子将它的适应值和它迄今为止经历的最好位置比较，如果较好，将其作为当前的最好位置；
- (4) 对每个粒子将它的适应值和种群中最好位置比较，如果较好，将其作为当前的最好位置；
- (5) 根据式(1)(2)更新每个粒子的速度和位置；
- (6) 如果未达到结束条件（通过为预设最大迭代次数）返回(2)。

## 4. 算法实例

在过程控制中，常常被近似为一阶或二阶典型工业过程，本文针对二阶对象和一阶延迟对象，分别用PSO优化方法和实值遗传算法(GA-D)和二进制遗传算法(GA-B)对PID控制参数进行整定

- (1) 被控制对象为二阶对象

$$G_1(s) = \frac{400}{s^2 + 50s}$$

- (2) 被控制对象为一延迟对象

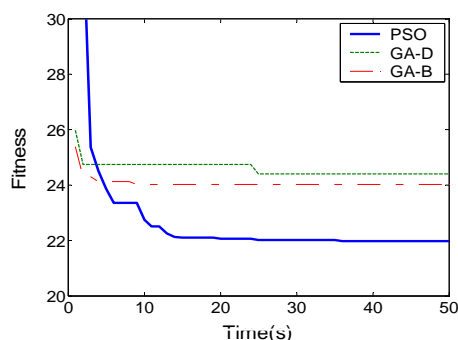
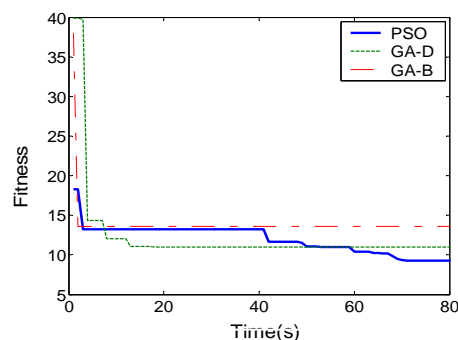
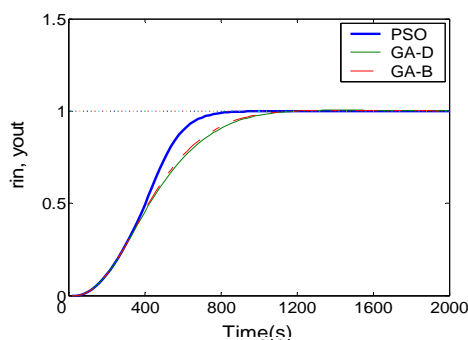
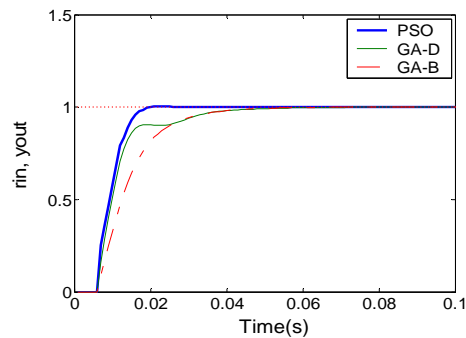
$$G_2(s) = \frac{e^{-80s}}{60s + 1}$$

表 1  $G_1(s)$  中三种不同方法进化的结果

	GA-D	GA-B	PSO
$K_p$	17.3916	19.7067	62.2321
$K_i$	0.2089	0.2483	0.5096
$K_d$	0.3195	0.2483	2.2401
$F$	24.4078	24.0197	21.9672

表 2  $G_2(s)$  中三种不同方法进化的结果

	GA-D	GA-B	PSO
$K_p$	0.4228	0.6256	0.39007
$K_i$	0.7764	0.3832	4.3788
$K_d$	0.0044	0.0038	0.0035
$F$	12.2348	14.3231	9.6612

图 2  $G_1(s)$  中适应度函数的优化过程图 3  $G_2(s)$  中适应度函数的优化过程图 4  $G_1(s)$  阶跃响应图 5  $G_2(s)$  的阶跃响

本文采用MATLAB语言编程，并进行仿真。仿真中，实值遗传算法参数取为：交叉概率  $P_c = 0.86$ ，变异概率  $P_m = 0.05$ ；二进制遗传算法参数取为：交叉概率  $P_c = 0.60$ ，变异概率  $P_m = 0.01$ ，编码长度为30；粒子群参数取为：惯性权  $w_{\max} = 0.9$ ,  $w_{\min} = 0.4$ ，最大速度  $V_{\max} = 5$ ，加速因子  $c_1 = c_2 = 2.0$ 。三种方法中种群规模皆为30。

$G_1(s)$  中采样时间取1ms,  $G_2(s)$  中采样时间为20s, 输入指令均为阶跃信号； $G_1(s)$  中经过50代进化,  $G_2(s)$  中经过80代进化, 参数自整定过程中适应值变化如图2-3示, 阶跃响应曲线见图4-5, 整定的结果见表1-2。

从图2-3可以看出, 当遗传算法几乎早熟收敛时PSO算法仍能继续进化, 与遗传算法相比PSO算法有着较快的收敛速度和优化精度。

从图4-5可以看出, PSO-PID有着较快的响应速度, 并且在控制过程中系统无超调现象, 控制品质较高。

另外, 由于PSO算法没有遗传算法中的交叉变异步骤, 所以它在进化寻优中节约程序运行的时间。实值遗传算法与二进制遗传算法相比在迭代过程中无需对染色体译码其寻优效率略高于二进制遗传算法。

## 5. 结论

本文采用粒子群算法对PID控制系统进行参数优化设计,通过仿真实验可以看出,PSO算法具有良好的鲁棒性和动态品质。算法的优化性能和效率都比遗传算法有一定的提高。对传递函数具有大滞后环节时,PSO算法仍能满足系统对PID参数自适应的要求。因此,采用粒子群算法进行PID参数寻优是一种具有较好实用价值的优化方法。

本文只是初步研究了PSO算法在PID参数整定中的应用,下一步的工作包括提出改进的粒子群算法以进一步获得更为优良的控制效果。

## 参考文献

- [1] J.G. Ziegler and Nichols, "Optimization setting for automatic controller" *Trans. ASME*, vol. 64 no.11 pp.756-769, 1942
- [2] A. Visioli, "Tuning of PID controllers with fuzzy logic," *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicat.*, vol. 148, no. 1, pp. 1-8, Jan. 2001.
- [3] T. L. Seng, M. B. Khalid, and R. Yusof, "Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithm," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B*, vol. 29, pp. 226-236, Apr. 1999.
- [4] Y. Mitsukura, T. Yamamoto, and M. Kaneda, "A design of self-tuning PID controllers using a genetic algorithm," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, San Diego, CA, pp. 1361-1365, June 1999,
- [5] R. A. Krohling and J. P. Rey, "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithm," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 5, pp. 78-82, Feb. 2001.
- [6] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, vol. IV, Perth, Australia, pp. 1942-1948, 1995,
- [7] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput.*, Anchorage, AK, pp. 69-73, May 1998,
- [8] L. Wang, "Application of adaptive genetic algorithms in PID controller design", *J. Xi ' An Univ. Sci. & Tech.* vol. 25, no. 1, pp. 93-95, 2005

## Self-tuning of PID Controller parameters Based on Particle Swarm Optimization

LiJun LUAN<sup>1</sup> LiJing TAN<sup>1</sup> Ben NIU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Liaoning Technical University, Fuxin, PRC 123000

<sup>2</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, PRC 110016

## Abstract

*As viewed from optimization, the self-tuning of PID controller parameters is to find the best global optimum in the solution space with  $K_p, K_i, K_d$ . Particle swarm optimization is a new evolutionary computation, which has a better convergence rate and computation precision compared with other evolutionary algorithms. It also can find the global optimum to the solving-problems with a high speed and a high efficiency. In this paper a new method for self-tuning PID controller parameters based on PSO is proposed. In the simulation part the proposed method is compared with GA and the experimental results illustrate that PSO performs better than GA in terms of the convergence rate and solution precision.*

**Keywords:** Particle Swarm Optimization PID Controller Swarm Intelligence

作者简介:

栾丽君, 女, 1963年生, 黑龙江七台河人。博士, 教授。主要研究方向: 机电一体化、智能控制、工业设计。

谭立静, 女。1980年生, 辽宁朝阳人。硕士。主要研究方向: 机械优化设计、智能控制。

牛奔, 男。1980年生, 安徽全椒人。博士。主要研究方向: 群体智能、生物计算与建模。