

# 基于 PSO 算法的目标值前馈型二自由度 PID 控制器的优化设计

王海稳<sup>1</sup>, 张井岗<sup>1</sup>, 曲俊海<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中国兵器工业集团 第 207 研究所, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 微粒群优化算法是一种全局优化技术, 算法简单、容易实现. 其通过微粒间的相互作用发现复杂搜索空间中的最优区域. 提出了将微粒群优化算法用于二自由度 PID 控制器参数的寻优设计中, 并以工业过程中常见的对象为模型, 进行了 Matlab 仿真试验, 仿真结果表明系统同时具有了最优的目标值跟踪特性和干扰抑制特性, 证明了 PSO 算法的有效性.

**关键词:** 二自由度控制; PID 控制; 微粒群优化; 参数优化

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2006)02-0058-04

## Optimal design for two degree-of-freedom PID controller based on PSO algorithm

WANG Hai-wen<sup>1</sup>, ZHANG Jing-gang<sup>1</sup>, QU Jun-hai<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. The 207 Research Institute, China North Industries Group Corporation, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Particle swarm optimization (PSO) algorithm is a random global optimization technology. The algorithm is simple and easy to be implemented. Through interaction between particles, the algorithm can find the optimal area in complicated searching space. A method is presented, for optimizing two-degree-of-freedom PID controller parameter by using PSO algorithm and then optimization algorithm is tested by simulation experiment in the common industrial model based on MATLAB. The simulation results show that the system is simultaneously both the characteristics of command tracking and disturbance rejection. The simulation verifies the effectiveness of the PSO algorithm.

**Key words:** two-degree-of-freedom control; PID control; particle swarm optimization; parameters optimization

目前,关于二自由度的优化设计的研究主要从以下 3 个方向进行:1) 减少优化参数量,把待优化的参数从 2 组 6 个减少到 2 组 5 个或 2 组 4 个,甚至 2 个<sup>[1]</sup>;2) 一组参数固定,只优化另一组参数;3) 全部参数优化设计. 采用的方法主要有:以遗传算法<sup>[2-4]</sup>为代表的优化算法,与系统辨识<sup>[5]</sup>相结合的算法,与自适应<sup>[4]</sup>相结合的算法,与神经网络控制<sup>[5-7]</sup>和与模糊控制<sup>[8-9]</sup>相结合的算法等. 但这些整定参数的方法还存在某些不足,如遗传算法要涉

及到繁琐的编码解码过程以及较大的计算量,容易发生“早熟”、收敛慢、性能对参数有较大的依赖性等优点,限制了它的应用. 神经网络在隐层数目、隐层神经元个数以及权值初始化等方面还没有系统的方法,模糊推理本身的参数就需要优化,所以,二自由度 PID 参数的整定过程仍然显得比较繁琐. 微粒群算法 (particle swarm optimization) 是继遗传算法、蚁群算法之后的又一种群体智能算法,它是一类随机全局优化技术,算法通过粒子间的相互作用发现复杂搜索空间中的最优区域. 由于 PSO 算法概念简单,容易实现,短短的几年时间,PSO 算法便获得了很大的发展,并得到了广泛应用<sup>[10]</sup>. 文中将微粒群

收稿日期:2006-02-28.

基金项目:太原科技大学青年基金资助项目(2006103).

优化算法用于文中二自由度的 PID 控制器参数的寻优设计<sup>[11]</sup>,使系统同时获得了最优的目标值跟踪特性和干扰抑制特性,证明了 PSO 算法的有效性。

1 PSO 算法原理

微粒群算法最早是在 1995 年由美国社会心理学家 J. Kennedy 和电气工程师 R. Eberhart 共同提出的。微粒群算法与其他进化算法相类似,也采用“群体”与“进化”的概念,同样也是依据个体(微粒)的适应值大小进行操作。所不同的是,微粒群算法不像其他算法那样对个体使用进化算子,而是将每个个体看作是在  $D$  维搜索空间中的一个没有质量和体积的微粒,并在搜索空间中以一定的速度飞行,该飞行速度由个体飞行经验和群体飞行经验进行动态调整。 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  为微粒  $i$  的当前位置,每个微粒的位置就是一个潜在的解。将  $X_i$  代入目标函数就可以计算出其适应值,根据适应值的大小来衡量其优劣; $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  为微粒  $i$  所经历的最好位置,也就是微粒  $i$  所经历过的具有最好适应值的位置,称为个体最好位置,也称为  $P_{best}$ ;  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  为微粒  $i$  当前的飞行速度,当前组成群体的所有微粒经历过的最好位置记为  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ ,也称为  $G_{best}$ 。对每一次迭代,其第  $D$  维根据如下方程更新:

$$v_{iD}(k+1) = v_{iD}(k) + c_1 \text{rand}() (p_{iD} - x_{iD}(k) + c_2 \text{Rand}() (p_{gD} - x_{iD}(k)), \tag{1}$$
$$x_{iD}(k+1) = x_{iD}(k) + v_{iD}(k). \tag{2}$$

式(1)的第一部分为微粒先前的速度,这个部分维持着算法拓展搜索空间的能力;第 2 部分为“认知”部分,表示微粒本身的思考;第 3 部分为“社会”部分,表示微粒间的信息共享与相互合作。式中  $c_1$  和  $c_2$  是加速常数,通常设为 2,  $\text{rand}()$  和  $\text{Rand}()$  为 2 个在  $[0, 1]$  内变化的随机数。此外,微粒的速度  $v_i$  被一最大的速度  $v_{\max}$  所限制,如果当前对微粒的加速导致它在某维的速度超过该维的最大速度,则该维的速度被限制为该维的最大速度,最大速度太高或太低都不可能找到最优解,通常设置为每维变化范围的 10%~20%。迭代终止的条件需要根据具体问题选择,一般选为最大迭代次数或粒子群迄今为止搜索到的最优位置满足预定的最小适应阈值。为惯性权重,它使微粒保持运动惯性,起着调整算法全局和局部搜索能力的作用。对全局进行搜索,通常的好方法是在前期有较高的搜索能力以得到合适的种子,而在后期有较高的开发能力以加快收敛速度,为此可将  $\omega$  设为随时间线性减小,例如由 1.1 到 0.3。但

这种做法只有在算法能够搜索到全局最优附近时才是有效的,否则可能更容易陷入局部最优。文中随机地给不同的微粒群分别赋予不同的惯性权重,较好的协调了算法的局部与全局搜索能力。

2 利用 PSO 优化二自由度 PID 参数

2.1 二自由度 PID 调节器

传统的 PID 调节器,只有一组可调的 PID 参数,若按干扰抑制特性整定 PID 参数,则目标跟踪特性变差;若按目标值跟踪特性整定 PID 参数,则干扰抑制特性变差。所以只能采用折衷的方法来整定 PID 参数,这样很难得到最佳的控制效果。为了解决这一矛盾,二自由度 PID 调节器的思想被提出,并在实际应用中获得了良好的效果。二自由度 PID 不是有 2 个独立的 PID 调节器组成但是它能独立的设定 2 组 PID 参数,使目标值跟踪特性及干扰抑制特性同时达到最佳。

二自由度 PID 调节器的结构是多种多样的,其中易懂且适于工业化应用的 4 种包括:1) 目标值滤波器型;2) 目标值前馈型;3) 反馈补偿型;4) 回路补偿型;文中采用目标值前馈型二自由度控制系统如图 1 所示。

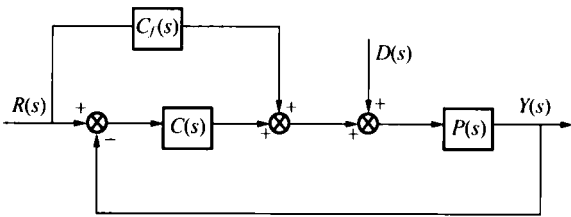


图 1 目标值前馈型二自由度控制系统结构图  
Fig. 1 Feedforward type expression of the 2DOF PID control systems

图中  $P(s)$  为被控对象,  $C_f(s)$  为前馈补偿器,  $C(s)$  为主控制器,  $R(s)$ 、 $Y(s)$  和  $D(s)$  分别为控制系统的输入、输出和干扰信号。

$$Y(s) = \frac{C(s) + C_f(s) P(s)}{1 + P(s) C(s)} R(s) + \frac{P(s)}{1 + P(s) C(s)} D(s). \tag{3}$$

$$C(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D D(s) \right). \tag{4}$$

$$C_f(s) = - K_P ( + T_D D(s) ). \tag{5}$$

$$D(s) = \frac{s}{1 + s} \quad ( = 0.001 ). \tag{6}$$

根据式(3)及二自由度 PID 调节器的设计原则可以得到:

1)  $C(s)$  来完成干扰的最佳抑制. 调整  $K_P$ ,  $T_I$ ,

$T_D$  即可实现.

2)  $C_f(s)$  来完成目标的跟踪最佳. 调整  $\lambda$  (二自由度系数) 即可实现.

## 2.2 二自由度 PID 调节器参数整定

传统二自由度 PID 调节器的参数整定一般是先采用常规 PID 参数整定方法调整  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  实现干扰抑制最佳, 然后根据推荐表提供的经验值一次选定二自由度化系数实现目标值跟踪特性的要求, 但这样的结果并不是最优的. 文中将 PSO 用于二自由度 PID 调节器的参数整定, 其过程如下:

1) 借助传统的参数整定方法, 粗略地确定各参数的取值范围.

2) 设置相关参数, 比如种群规模  $m$ 、惯性权重、加速度常数  $c_1$  和  $c_2$ 、适应度函数以及算法结束的条件等.

3) 初始化群体中微粒的初始位置和初始速度.

4) 评价每个微粒的适应度.

5) 对每个微粒, 将其适应值与其经历过的最好位置  $p_{best}$  相比较, 如果当前适应值较好, 则将其作为当前最好位置  $p_{best}$ .

6) 对每个微粒, 将其适应值与群体经历的历史的最好位置  $g_{best}$  相比较, 如果当前群体中最好的适应值较好, 则将其置为新的  $g_{best}$ , 并记录其索引号.

7) 根据算式 (1)、(2) 更新各微粒的位置和速度.

8) 如果达到结束条件 (通常为足够好的适应值或达到预设的最大代数), 则返回当前最佳微粒的结果, 否则返回 4), 继续下一次循环.

## 3 基于 PSO 的二自由度 PID 调节器参数整定目标函数的选择

利用 PSO 对二自由度 PID 调节器参数进行整定, 其关键和难点在于目标函数的选择. 文中采用和文献 [11] 相同的目标函数:

$$J[\lambda, p, H(s)] = \int_0^{\infty} \left| \left( \lambda \left\{ \frac{d^p H(s)}{ds^p} \right\} \right)_{s=j} \right|^2 d\lambda. \quad (7)$$

这里  $H(s)$  是在拉普拉斯域阶跃输入误差的响应, 比如:  $G_{yd}(s)/s$  或  $G_{er}(s)/s$ . 当  $\lambda = 1$  时, 通过 Parseval's 公式可以得到:

$$J[1, P, H(s)] = \int_0^{\infty} \{ t_p e_{step}(t) \}^2 dt. \quad (8)$$

这种基于时间加权误差的平方积分的目标函数已经在 PID 整定的很多文献中用过. 式 (7) 的显著特点是引入了频率权重  $\lambda$ , 在高频域使用较大的, 可以抑制高频范围内反馈增益, 且在 PID 控制应用的大多数情况下, 可以阻止系统变得振荡, 用大量不同

取值的  $\lambda$  和  $p$  做测试, 文献 [12] 取:

$$\lambda = 1/4, p = 2. \quad (9)$$

可以使得常见的 PID 控制系统在传统意义上最优, 即超调量少于 20%, 稳定时间一样或少于由 CHR 法整定的最优系统.

文中就是在满足式 (9) 条件下采用式 (7) 作为目标函数来整定的二自由度 PID 控制系统.

## 4 仿真研究与分析

针对图 1 所示的系统, 其中系统的受控对象

$$P(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.2s},$$

采用 PSO 对二自由度 PID 调节器参数进行整定. PSO 所需选定的参数: 加速度常数  $c_1 = 2$ ,  $c_2 = 2$ ; 种群规模  $m = 50$ ;  $G = 40$ ;

1) 调整  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  使得  $J[\lambda, p, G_{ed}(s)/s]$  最小.

式中:  $G_{ed}$  是从干扰  $d$  到误差  $e$  的闭环传递函数. 即  $G_{ed}(s) = -G_{yd}(s)$ .

2) 调整  $\lambda$ , 使得  $J[\lambda, p, G_{er}(s)/s]$  最小. 式中:

$G_{er}$  是从设定值  $r$  到误差  $e$  的闭环传递函数.  $G_{er} = 1 - G_{yr}(s)$ . 采用 PSO 对二自由度 PID 调节器参数进行整定结果为

$$K_P = 5.6959, T_I = 0.3898, T_D = 0.0966; \lambda = 0.8832, p = 0.868;$$

文献 [11] 二自由度 PID 调节器参数为

$$K_P = 6.32, T_I = 0.4, T_D = 0.08; \lambda = 0.61, p = 0.64;$$

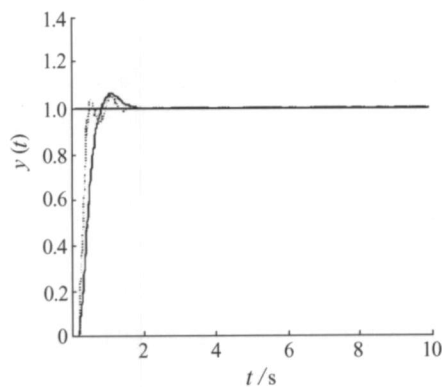


图2 单位阶跃响应

Fig. 2 Step response

由图 2 及图 3 (虚线: PSO 算法, 实线: 文献 [6] 方法) 可以看出, 文献 [11] 方法选取的参数, 尽管可以得到满意的跟踪和抑制特性, 但并非最优. 而基于 PSO 算法设计的二自由度 PID 调节器, 不仅可使系统具有满意的跟踪性能, 能很好地抑制干扰, 性能指标也相应地从 3.3917 下降到 1.6253, 而且超调小, 并且整个系统的鲁棒性能也有很大提高, 且算法容易实现.

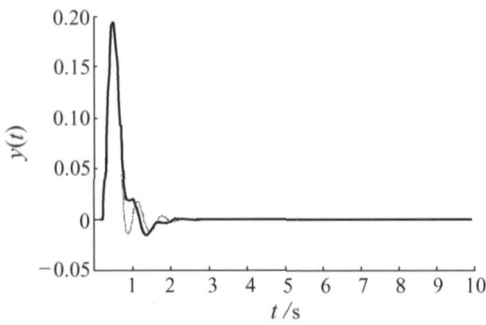


图 3 系统干扰响应

Fig. 3 Response of disturbance

## 5 结束语

本文将微粒群优化算法应用于二自由度 PID 调节器设计,改善了传统二自由度 PID 调节器,仿真效果很好.微粒群算法除了具有算法简单、容易实现等优点外,还具有更快的收敛速度和更高的效率及全局收敛性,是一种适于应用的参数寻优方法.

## 参考文献:

- [1] 张井岗,李临生,陈志梅. 二自由度 PID 调节器的内模整定方法[J]. 仪器仪表学报,2002,23(1):23-28.  
ZHANG Jinggang, LI Linsheng, CHEN Zhimei. IMC tuning of two-degree-of-freedom PID regulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1): 28-30.
- [2] 徐洪泽,徐漫涛,张恩福. 一种改进的基于用于二自由度 PID 调节器设计[J]. 系统仿真学报,1999,11(2):59-64.  
XU Hongze, XU Mantao, Fuen Zhang. Two-degree-of-freedom PID regulator design using an improved genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(2): 59-64.
- [3] 王强,麻亮. 基于改进混合遗传算法的二自由度 PID 控制器设计与应用[J]. 控制与决策,2001,16(2):195-198.  
WANG Qiang, MA Liang. Design for 2-DOF PID controller based on hybrid genetic algorithm and its application[J]. Control and Decision, 2001, 16(2): 195-198.
- [4] 霍海波,张井岗,王卫红. 一种基于自适应遗传算法的二自由度 PID 调节器设计[J]. 太原重型机械学院学报,2005,26(1):42-45.  
HUO Haibo, ZHANG Jinggang, WANG Weihong. Design for 2-DOF PID regulator based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2005, 26(1): 42-45.
- [5] KUNG Y S, LIAW C M, OUYANG M S. Adaptive speed control for induction motor drives using neural networks[J]. IEEE Trans Ind Electron. 1995, 42(1): 25-32.
- [6] 邱公伟,林瑞全. 参数自整定二自由度 PID 全神经元实现的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2003,14(10):1293-

1295.

- QIU Gongwei, LIN Ruiquan. Full neuron realization of parameters auto-adjusting two-degree-of-freedom PID[J]. Journal of System Simulation, 2003, 14(10): 1293-1295.
- [7] 邱公伟. 神经元滤波型 2 自由度 PID 控制器研究[J]. 信息与控制,2003,31(6):557-560.  
QIU Gongwei. Study of single neuron filtering two-degree-of-freedom PID controller[J]. Information and Control, 2003, 31(6): 557-560.
- [8] LIAW C M, CHENG S Y. Fuzzy two-degrees-of-freedom speed controller for motor driver[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1995, 42(2): 209-216.
- [9] LIAW C M, LIN F J. Position control with fuzzy adaptation for induction servomotor drive[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 1995, 142(6): 397-404.
- [10] 谢晓峰,张文俊,杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策,2003,18(2):129-134.  
XIE Xiaofeng, ZHANG Wenjun, YANG Zhilian. Overview of Particle Swarm Optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 129-134.
- [11] ARAKI M, HIDEFUMI T. Two-degree-of-freedom PID controllers[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2003, 1(4): 401-410.
- [12] TAGUCHI H, DOI M, ARAKI M. Optimal parameters of two-degree-of-freedom PID control systems[J]. Trans SICE, 1987, 23(5): 889-895.

### 作者简介:



王海稳,女,1978 年生,硕士,2001 年毕业于太原重型机械学院,主要研究方向为智能控制和二自由度控制. E-mail: whw78@sohu.com



张井岗,男,1965 年生,教授,主要研究方向为鲁棒控制和智能控制及其应用,主持和完成国家九五攻关项目、山西省自然科学基金项目、山西省青年科学基金项目等研究课题,发表学术论文 60 多篇,其中 18 篇分别被 EI、ISTP 收录.



曲俊海,男,1979 年生,2001 年毕业于太原重型机械学院,获双学士学位,主要研究方向为大功率随动控制系统设计工作.