

一种 PID 参数整定的粒子群优化算法

张兴华, 李 伟, 周刘喜

ZHANG Xing-hua, LI Wei, ZHOU Liu-xi

南京工业大学 自动化学院, 南京 210009

College of Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China

E-mail: zxhnjut@163.com

ZHANG Xing-hua, LI Wei, ZHOU Liu-xi. Particle swarm optimization algorithms for parameter tuning of PID controllers. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(33): 227-229.

Abstract: A particle swarm optimization algorithms for parameter tuning of PID controllers is proposed. First, a fitness function which includes some terms represent overshoot, rise time and steady error of the system is defined, and the terms are weighted properly. Then the particle swarm optimization algorithms with a constriction factor is used for multi-objective optimization of PID controllers, and the auto parameter tuning of PID controllers can be realized. Simulation results show that the synthesized performance of PID controllers obtained by the proposed method superior to that by standard methods.

Key words: PID controller; particle swarm optimization; multi-objective optimization; parameter tuning

摘 要: 提出了一种 PID 控制器参数整定的粒子群优化算法。该方法首先通过定义一个包含系统超调量、上升时间和稳态误差指标项的适应度函数, 并根据系统的实际控制要求对各指标项适当加权。之后由带收缩因子的粒子群算法对 PID 进行多目标寻优, 从而实现 PID 控制器的自动参数整定。仿真结果表明, 该方法优化得到 PID 控制器的综合性能优于常规方法得到的 PID 控制器。

关键词: PID 控制器; 粒子群算法; 多目标优化; 参数整定

文章编号: 1002-8331(2007)33-0227-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP273.2

1 引言

PID 控制器是最早提出的反馈控制器之一。由于其具有算法简单、鲁棒性强和可靠性高的特点, 在工业控制系统中得到广泛应用。PID 控制器的设计一直是自动控制领域里受到广泛关注的一个重要课题, 现已提出了多种 PID 参数整定方法^[1,2]。这些方法可一般地分为两类: 基于时域指标的设计方法和基于频域指标的设计方法。频域设计法以满足一定的增益裕量和相角裕量为目标, 可以获得良好的鲁棒性; 时域设计法以某种性能指标极小为目标(如 ISE 和 ISTE 等), 输出响应性能较好。然而, 上述常规 PID 参数整定方法大都是针对某一类具体的被控对象或是某一类特定的性能指标而提出的, 缺乏通用性和柔性。当系统对快速性、稳定性和鲁棒性等都有明确要求时, 常规 PID 设计方法往往难以同时兼顾, 不易获得满足实际要求的最优 PID 参数。

粒子群算法^[3](Particle Swarm Optimization, 简称 PSO) 是进化技术的一种, 源于对鸟群捕食行为的研究, 本质上属于一种迭代随机搜索算法, 具有并行处理特征, 鲁棒性好, 原理上可以较大的概率找到优化问题的全局最优解, 且易于实现, 计算效率高, 已成功的应用于求解多种复杂的优化问题^[4-6]。

本文针对 PID 控制器设计的多目标优化特点, 提出了一种 PID 参数整定的粒子群优化算法。首先, 通过定义一个包含系

统输出超调量、上升时间和稳态误差指标项的适应度函数, 并根据实际控制系统的性能要求, 对各指标项适当加权。之后, 采用带收缩因子的粒子群算法对 PID 进行多目标寻优。给出的优化算法具有良好的全局搜索能力和较高的收敛速度。可以直接根据 PID 控制系统的输出响应对 PID 控制器参数进行整定, 方便地在控制系统的快速性和稳定性之间进行平衡。算法的实现不依赖于实际的被控对象模型, 具有广泛的实用性。

2 PID 控制算法

PID 控制器通过对反馈误差信号进行比例、积分和微分运算, 以运算结果的加权和来构成系统的控制信号, 其传递函数描述可写为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

实际中常将控制器中的纯微分环节进行滤波处理, 这样 PID 控制器的传递函数成为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_d s / N} \right) \quad (2)$$

其中 K_p 是比例常数, T_i 和 T_d 分别是积分和微分时间常数, N 为一个较大的正数(文中取 $N=10$)。PID 控制器的优化设计, 就是寻找合适的 K_p 、 T_i 和 T_d , 在控制系统的快速性和稳定性之间进行平衡, 尽量减小超调量和稳态误差, 提高动态响应速度。

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目(the Natural Science of Department of Education of Jiangsu Province, China under Grant No. 06KJB510040)。

作者简介: 张兴华(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力传动控制, 进化计算与智能优化方法。

3 粒子群算法

PSO 算法^[3]是 Kennedy 和 Eberhart 等受鸟群在寻觅食物时的行为启示,于 1995 年提出的一种优化算法。该算法通过群体之间的信息共享和个体对自身经验的总结来修正个体的行动策略,进而求得优化问题的解。

标准的 PSO 初始化为一群随机粒子,然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新粒子在空间中的飞行速度和位置。第一个极值就是当前第 i 个粒子本身所找到的最优解,称为个体极值,记为 $\mathbf{p}_{best}^i=(p_1^i, p_2^i, \dots, p_D^i)$ 。另一个极值是当前整个种群找到的最优解,称为全局极值,记为 $\mathbf{p}_{gbest}=(p_1, p_2, \dots, p_D)$ 。若将第 i 个粒子的速度记为 $\mathbf{V}^i=(v_1^i, v_2^i, \dots, v_D^i)^T$,表示一次迭代计算引起的粒子位置变化量。而每个粒子的位置记为 $\mathbf{X}^i=(x_1^i, x_2^i, \dots, x_D^i)^T$,代表一个优化问题的潜在解。则每一次迭代计算中,第 i 个粒子的速度和位置由下式来更新^[7]

$$\mathbf{V}^i(t+1)=w\mathbf{V}^i(t)+c_1r_1(\mathbf{p}_{best}^i(t)-\mathbf{X}^i(t))+c_2r_2(\mathbf{p}_{gbest}(t)-\mathbf{X}^i(t)) \quad (3)$$

$$\mathbf{X}^i(t+1)=\mathbf{X}^i(t)+\mathbf{V}^i(t+1) \quad (4)$$

其中 i 表示粒子序号, t 是迭代次数, D 为解空间的维数。 w 是一个小于 1 的常数,称为惯性权重,表示过去速度对当前速度的影响,一般在优化初期取值较大,后期逐渐变小; c_1 和 c_2 是正常数,称为加速因子,分别用于表示粒子自身的认知(cognitive)和群体中粒子间的信息共享(social),用于解决全局和局部搜索能力之间的矛盾; r_1 和 r_2 是 [0, 1] 之间满足正态分布的随机数。

近年来, Clerc 等^[8]对标准的 PSO 进行了改进,提出带收缩因子的粒子群算法。研究表明,在标准 PSO 算法中引入收缩因子,可以提高 PSO 算法的收敛速度。带收缩因子的 PSO 的速度更新算式写为

$$\mathbf{V}^i(t+1)=\chi[\mathbf{V}^i(t)+c_1r_1(\mathbf{p}_{best}^i(t)-\mathbf{X}^i(t))+c_2r_2(\mathbf{p}_{gbest}(t)-\mathbf{X}^i(t))] \quad (5)$$

其中 χ 称为收缩因子,典型的收缩因子计算式为

$$\chi = \frac{2k}{|2-\phi-\sqrt{\phi^2-4\phi}|} \quad (6)$$

其中 $\phi=c_1+c_2$, $\phi>4$, $k=1$,带收缩因子 PSO 的位置更新算式与式(4)相同。

4 PID 参数整定的粒子群优化算法实现

PID 控制器的优化设计可视为一个多目标的优化问题。PID 的参数整定,就是在控制系统的快速性与稳定性之间进行折衷。常规的 PID 参数整定方法很难同时兼顾多项性能指标,得到的 PID 控制器参数通常不是最优的。而采用 PSO 来对 PID 参数进行优化设计,利用 PSO 的全局搜索和多目标优化能力,可以克服常规 PID 参数整定方法的缺点,获得具有满意性能的 PID 控制器。PID 参数整定的 PSO 算法的实现步骤具体如下:

步骤 1 初始化。 $t=0$ 时,初始化随机地产生 n 由个粒子组成的种群 $\mathbf{P}(0)=\{\mathbf{P}^1(0), \mathbf{P}^2(0), \dots, \mathbf{P}^n(0)\}$, 其中 $\mathbf{P}^j(0)=[K_p^j(0), T_i^j(0), T_d^j(0)]$ 表示第 j 个粒子在解空间的坐标分量,也就是 PID 控制器的三个待优化的参数。为使初始的 PID 参数不至于偏离最优解太远,将每个初始化的 PID 参数取为 Ziegler-

Nichols 法整定的 PID 参数 K_p, T_i 和 T_d 值的 0.3~5 倍之间的随机数。初始速度 $\mathbf{V}^j(0)=[v_1^j(0), v_2^j(0), v_3^j(0)]^T$ 取为 0~1 之间的随机数。

步骤 2 粒子性能评估。定义包含超调量、上升时间和稳态误差指标项的性能函数 $J(\mathbf{p}^j)$ 来评价 PID 控制器(对应于个体 \mathbf{p}^j)的综合性能

$$J(\mathbf{p}^j)=w_1\sigma+w_2t_r+w_3\sum_{k=1}^{n_s}\frac{|e_k|}{n_s} \quad (7)$$

其中 $\sigma=|y_p-y_{ref}|/y_{ref}\times 100\%$ 表示 PID 控制系统输出的超调量, y_p 是输出峰值, y_{ref} 是输入参考值; t_r 为上升时间,这里将其定义为闭环控制系统输出从 0 第一次达到 0.95 y_{ref} 的时间; $e_k=y_k-y_{ref}$ 为采样时刻 k 的输出误差, n_s 是采样点数。 w_i 是加权系数,其值对优化后的 PID 控制器的性能有很大影响。 w_i 的取值一般应使性能函数中各指标项的大小具有相同的量级。在此基础上,可以根据系统对快速性和稳定性的具体要求,对 w_i 的值进行适当调整。

根据式(7)来计算种群中每一个粒子的适应度,由适应度函数值 $f(\mathbf{p}^j(0))=J(\mathbf{p}^j(0))$ 的大小来评价粒子的优劣。

对于种群中的每个粒子,设个体的最佳位置为 \mathbf{p}_{best}^j (适应度最小),则在初始种群中

$$\mathbf{p}_{best}^j(0)=\mathbf{p}^j(0), j=1, 2, \dots, n$$

找出适应度最小的个体 $\mathbf{p}^k(0)$, 种群中的最佳位置 \mathbf{p}_{gbest} 即为

$$\mathbf{p}_{gbest}(0)=\mathbf{p}^k(0)=[K_p^k(0), T_i^k(0), T_d^k(0)]$$

步骤 3 根据式(5)和式(4)更新当前代中每个粒子的速度和位置。

步骤 4 根据当前代中每个粒子的位置计算对应的适应度 $J(\mathbf{p}^j(t))=f(\mathbf{p}^j(t))$ (t 是迭代次数), 如果 $J(\mathbf{p}^j(t))\leq J(\mathbf{p}^j(t-1))$, 则更新个体的最佳位置 $\mathbf{p}_{best}^j(t)=\mathbf{p}^j(t)$ 。否则 $\mathbf{p}_{best}^j(t)=\mathbf{p}_{best}^j(t-1)$, $j=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 5 寻找当前种群中具有最小 J 的粒子, 设为第 k 个粒子。若 $J(\mathbf{p}^k(t))\leq \mathbf{p}_{gbest}(t-1)$, 则更新全局最佳位置 $\mathbf{p}_{gbest}(t)=\mathbf{p}^k(t)$, 否则 $\mathbf{p}_{gbest}(t)=\mathbf{p}_{gbest}(t-1)$ 。若终止条件满足(文中设为迭代次数达到最大值), 则算法结束, 否则 $t=t+1$, 转到步骤 3。

5 仿真结果及分析

为验证粒子群算法对 PID 控制器进行优化设计的有效性,用带收缩因子的 PSO 对以下被控对象^[9]的 PID 控制器进行多目标寻优,被控制对象的传递函数为

$$G_p(s)=\frac{1}{(s+0.1)(s+0.2)(s+0.7)} \quad (8)$$

优化过程中,种群的规模取为 30,加速因子 $c_1=c_2=2.05$,收缩因子 $\chi=0.729$,最大迭代次数设为 30。图 1 是将适用度函数的加权系数 w_1, w_2, w_3 分别取为 1.0, 0.05 和 1.0 时,优化过程中适应度函数的变化曲线。从中可以看出算法的收敛速度很快(纵坐标为适应度函数的对数值)。图 2 是优化得到的 PID 控制器与 Ziegler-Nichols 方法、ISE 方法和 ISTE 方法得到的 PID 控制器的阶跃响应比较。表 1 给出了上述四种方法整定的 PID 参数及其控制性能指标。比较 PSO 优化得到的 PID 控制器与另三种常规方法得到的 PID 控制器,可以看出,前者的闭环控制

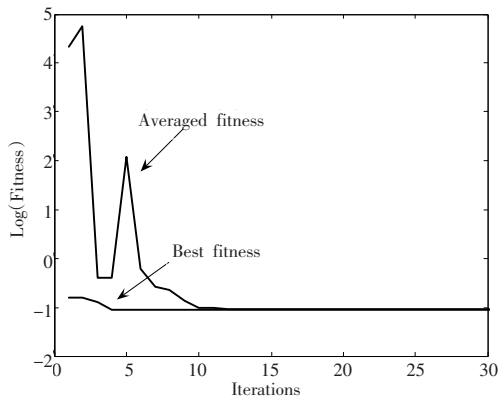


图1 适应度变化曲线

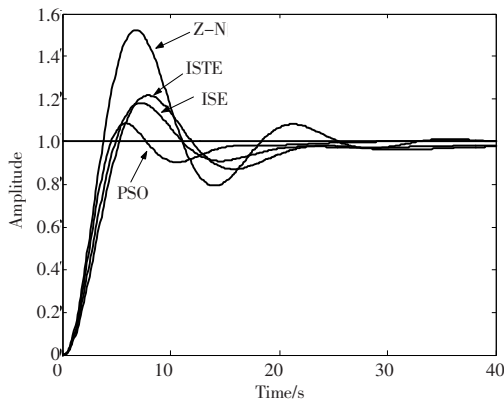


图2 闭环阶跃响应曲线

表1 不同方法得到的PID控制器参数及其性能指标

PID 整定方法	K_p	T_i	T_d	超调量 $\sigma\%$	上升时间 t_r	调节时间 t_s
Ziegler-Nichols	0.158 1	6.821 1	1.705 3	52.3	2.46	30.6
ISE	0.109 6	27.773 2	2.143 8	18.1	3.25	35.3
ISTE	0.109 0	33.381 2	1.621 1	21.6	3.53	48.3
PSO	0.078 6	16.145 7	4.985 9	8.33	2.82	15.6

超调量和调节时间都有显著的减小,其综合性能指标是四种方法中最好的。

(上接 220 页)

克服了当前很多决策方法主观性强的弱点。从上述实例可以看出,该模型不仅能客观地评价供应商现阶段的情况,同时可以综合考虑供应商的未来发展趋势,从而使企业可以从更远的角度来评价供应商,使得这个评价更客观、更全面、同时更有价值,其评价结果更加符合客观实际情况。这里主要给出选择供应商的方法,如应用该方法并结合原始数据,就可以比较容易地选出相对符合要求的供应商。(收稿日期:2007年3月)

参考文献:

- [1] Dickson G W. An analysis of vendor selection systems and decision[J]. Journal of Purchasing, 1966, 19: 150.
- [2] Weber C A, current j R. Vendor selection criteria and methods[J]. European Journal of Operational Research, 1991, 67(3): 2-18.
- [3] Menon M K. Selection criteria for providers of third-party logistics: an exploratory study [J]. Journal of Business Logistics, 1998, 19(1):

6 结论

针对常规 PID 设计方法存在的缺点,提出了一种可兼顾多项性能指标的 PID 控制器参数整定的粒子群优化方法。该方法采用带收缩因子的粒子群算法对 PID 参数进行寻优,算法有较快的收敛速度和良好的全局搜索能力。在 PID 控制器的优化过程中,通过定义包含系统输出超调量、上升时间和稳态误差指标项的适应度函数,并根据控制系统的实际性能要求对上述指标项适当加权,可得到满足不同性能要求的近似最优 PID 参数。仿真结果表明,该方法优化得到 PID 控制器的综合性能优于常规方法得到的 PID 控制器,是一种有效的 PID 参数整定方法,可广泛应用于实际 PID 控制系统的设计。

(收稿日期:2007年4月)

参考文献:

- [1] Astrom K J, Haggglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins[J]. Automatica, 1984 (20): 645-651.
- [2] Astrom K J, Haggglund T. PID controllers: theory, design and tuning[M]. Instrument Society of America, 1995.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [4] 夏蔚军, 吴智铭. 基于混合微粒群优化的多目标柔性 Job-shop 调度[J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 137-140.
- [5] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.
- [6] 苏成利, 徐志成, 王树青. PSO 算法在非线形系统模型参数估计中的应用[J]. 信息与控制, 2005, 34(1): 123-125.
- [7] Shi Yuhui, Eberhart. Modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, 1998: 69-73.
- [8] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002(6): 58-73.
- [9] Xu Jian-Xin, Hang Chang-Chieh, Liu Chen. Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller[J]. Automatica, 2000(36): 673-684.

121-136.

- [4] Sink H L, Langley C J. A managerial framework for the acquisition of third-party logistics services [J]. Journal of Business Logistics, 1997, 19(1): 121-136.
- [5] Sanjay J H, Ravi S. Selection of logistics service provider: an analytic network process (ANP) approach[J]. ARTICLE Omega, 2007, 35(3): 274-289.
- [6] 谌述勇, 陈荣秋. 论 JIT 环境下制造商和供应商之间的关系[J]. 管理工程学报, 1998(3).
- [7] 张炳轩. 动态供应链合作伙伴的评价体系及其模糊评价方法[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2001(3).
- [8] 马雪芬, 刘易勇, 孙树栋, 等. 供应链管理环境下第三方物流企业的评价选择[J]. 计算机工程与应用 2003, 39(2): 7-9.
- [9] 郑文军. 虚拟企业合作伙伴评价体系及优化决策[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2000(5).
- [10] 杜栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.