

一种采用改进 CPSO 算法的 PID 参数整定方法

黄为勇 高玉芹 张艳华

(徐州工程学院江苏省大型工程装备检测与控制重点实验室 徐州 221111)

摘要 为提高控制系统的性能,提出了一种采用改进混沌粒子群(CPSO)算法的PID参数整定方法。该算法将混沌搜索应用到粒子群算法的粒子位置和速度初始化、惯性权重优化、随机常数以及局部最优解邻域点的产生的全过程,使其不仅具有全局寻优能力,而且具有持续与精细的局部搜索能力。3种典型控制系统的PID参数整定实验结果验证了所提方法的有效性,其性能明显优于常规方法。

关键词 PID控制,参数整定,混沌优化,粒子群优化算法

中图分类号 TP181

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.11.054

Tuning PID Parameters Using Modified CPSO Algorithm

HUANG Wei-yong GAO Yu-qin ZHANG Yan-hua

(Jiangsu Key Laboratory of Large Engineering Equipment Detection and Control, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China)

Abstract To improve the performance of control system, a new method for tuning PID parameters was proposed by using modified chaotic particle swarm optimization algorithm(CPSO). The chaotic search is applied to the initialization of position and velocity of initial swarm, the optimization of inertia weight, the generation of random constant and the generation of the local optimum neighborhood point, so that the algorithm has the ability of global optimization and continuous and precise local search. The experimental results of 3 typical control systems show that the proposed method for tuning PID parameters is effective, and the performance is obviously superior to the conventional methods.

Keywords PID control, Parameters tuning, Chaotic optimization, Particle swarm optimization algorithm

1 引言

PID控制具有结构简单、鲁棒性强、易于工程实现等特点,多年来在工业过程中得到了广泛的应用。PID控制器是根据偏差的比例(Proportional)、积分(Integral)与微分(Derivative)的线性组合进行反馈控制,由于控制器的3个参数 K_P 、 K_I 和 K_D 的选择对控制系统的性能具有重要影响,其参数的整定已成为PID控制器应用需要解决的首要问题^[1]。

随着人工智能技术的不断发展,人们提出了许多PID参数整定方法,如基于模糊规则、基于神经网络以及遗传算法(genetic algorithm, GA)等多种整定方法^[2-4]。近年来根据鸟类群体行为研究结果的启发而提出来的粒子群优化算法^[5](particle swarm optimization, PSO)在许多领域得到了应用,文献^[6,7]将该算法应用到PID参数整定中。然而文献^[8]指出,基本粒子群优化算法具有计算快速性和算法易实现性的优点,但也存在不能保证全局收敛,甚至不能收敛于局部最优解的缺陷。

由于混沌运动具有伪随机性、遍历性以及初始条件的敏感性等特点,加之混沌信号产生机理简单,具有内在并行性的优点,基于混沌的搜索技术比其它随机搜索更具优越性^[9]。

文献^[10]也指出采用混沌运动特性的优化搜索方法具有更容易跳出局部、结构简单以及使用方便的优点。基于此,文献^[11,12]把混沌搜索应用到PSO粒子的位置和速度的初始化中,从而保证初始变量的随机性,但由于上述算法中的其他参数以及局部最优解邻域点的产生仍然是以普通的随机数的形式出现,因此并不能保证算法的种群多样性以及解空间上优化的遍历性,其本质上是一种不完全的混沌优化方法。

本文提出一种改进的混沌粒子群优化算法(chaotic particle swarm optimization, CPSO),并将其应用到PID参数的整定中。该方法将混沌搜索技术嵌入到PSO算法的初始种群产生、惯性权重 ω 优化到随机常数 r_1 、 r_2 以及局部最优解邻域点的产生等全过程;利用混沌特性提高种群的多样性和粒子搜索的遍历性,将混沌状态引入到优化变量使粒子获得持续搜索的能力,以改善粒子群优化算法摆脱局部极值点的能力,克服基本PSO算法的早熟、易陷入局部极值等固有缺陷,从而提高算法的优化性能。3种典型控制系统的PID参数整定仿真实验结果验证了所提方法的有效性,该算法能够得到比常规GA与基本PSO算法更好的PID参数优化效果,具有较好的工程应用价值。

到稿日期:2013-06-25 返修日期:2013-08-16 本文受江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20131124),徐州工程学院江苏省大型工程装备检测与控制重点实验室开放基金项目(JSKLEDC201221)资助。

黄为勇(1963—),男,博士,教授,CCF会员,主要研究方向为智能信息处理与无线传感器网络技术,E-mail:h_weiyong@163.com;高玉芹(1964—),女,副教授,主要研究方向为智能信息处理与无线传感器网络技术;张艳华(1978—),女,硕士,讲师,主要研究方向为数字信号处理技术。

2 控制系统的 PID 多目标优化模型

典型的控制系统由控制对象与 PID 控制器构成,如图 1 所示。其中, $r(t)$ 为系统输入, $y(t)$ 为系统输出。

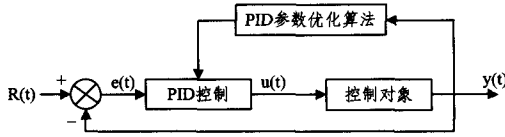


图 1 PID 控制系统结构图

PID 控制器由比例、积分和微分 3 个环节的线性组合所实现,其特性方程可表示为:

$$u(t) = K_P [e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

式中, K_P 、 K_I 和 K_D 分别为控制器的比例常数、积分常数和微分常数, $u(t)$ 为控制器的输出; $e(t)$ 为系统反馈偏差(PID 控制器的输入)。

在 PID 控制系统中,式(1)中的 K_P 、 K_I 和 K_D 3 个参数是否合适,对系统的控制性能具有重要影响。PID 控制器的参数优化整定是一个多目标优化问题,其核心就是要寻找到一个合适的寻找最优以 PID 控制器参数的组合,使得控制系统具有快速性和稳定性,减少超调,提高系统的响应速度。

本文以改进的 CPSO 算法为优化工具,以系统调节时间 t_s 、上升时间 t_r 、最大超调量 δ 及稳态误差 e_s 为优化指标设定优化算法的适应度函数,进行 PID 控制器多目标优化,以寻找最优或近似最优的 PID 控制器参数,达到最理想的性能指标。

3 改进的混沌粒子群优化算法

混沌运动具有遍历性、伪随机性和“规律性”的特点,能在一定范围内按其自身“规律”不重复地遍历所有状态,加之混沌信号产生机理简单,具有内在并行性的优点,采用混沌的搜索技术无疑会比其它随机搜索更具优越性^[13]。针对上述问题,根据混沌优化的思想,对基本粒子群优化算法进行如下几个方面的改进:

(1)将混沌引入到粒子的位置和速度的初始化中,利用混沌提高了种群的多样性和粒子搜索的遍历性,同时也不改变粒子群优化算法初始化时所具有的随机性本质。产生混沌的数学模型有很多,本文采用 Logistic 混沌方程构造混沌序列^[12]:

$$x(t+1) = \mu x(t)(1-x(t)), t=0,1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中, μ 是控制参数。当 $0 < x(0) < 1$, $\mu=4$ 时,Logistic 方程处于完全混沌状态,此时 $x(t)$ 的轨迹是混沌轨迹且在 $(0,1)$ 之间遍历。由任意初值 $x(0) \in [0,1]$ 可迭代出一个确定的时间序列 $x(1), x(2), x(3), \dots, x(n+1)$ 。

(2)将混沌状态引入到惯性权重 ω 优化中,使粒子获得持续搜索的能力,通过平衡全局和局部搜索能力,改善算法寻优性能,加快收敛速度。本文采用下式进行 ω 的混沌化,再将惯性权重映射至 (α, β) 区间。

$$\omega(i+1) = 4.0\omega(i) \cdot (1-\omega(i)) \quad (3)$$

$$\omega(i) = \alpha + (\beta - \alpha) \cdot \omega(i) \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, $i=1,2,\dots,T_m$, T_m 为最大迭代次数;惯性权重范围取 $\alpha=0.4, \beta=0.9$ 。

(3)将混沌引入到随机常数 r_1, r_2 中,以克服随机取值带来的效率低下的问题,提高算法的收敛性。本文采用 Logistic 混沌映射动态更新。

$$r_i(t+1) = 4.0r_i(t) \cdot (1-r_i(t)) \quad (5)$$

式中, $r_i(t) \in (0,1), i=1,2$ 。

(4)以当前整个粒子群搜索到的最优位置为基础产生混沌序列,用产生的混沌序列中的最优位置粒子替代当前粒子群中的一个粒子的位置。对于求解 d 维最优化问题,采用 d 个独立的混沌变量序列来产生该空间中点的 d 个坐标分量,通过产生一组与优化变量相同数目的混沌变量,用类似载波的方式将混沌引入优化变量使其呈现混沌状态,同时把混沌运动的遍历范围放大到优化变量的取值范围,然后直接利用混沌变量搜索,使解跳出局部极值区间,有利于提高搜索精度^[13]。

完全混沌粒子群优化算法步骤如下:

步骤 1 初始化设置最大允许迭代次数或适应度误差限,以及算法的学习因子 c_1 和 c_2 。

步骤 2 混沌初始化粒子位置和速度。

(1)随机产生一个 d 维且每个分量数值在 $0 \sim 1$ 之间的向量, d 为目标函数中的变量个数,根据式(2)得到 N 个向量。

(2)将各个分量载波到对应变量的取值区间。

(3)计算粒子群的适应值,并从 N 个初始群体中选择性能较好的 M 个解作为初始解,随机产生 M 个初始速度。

步骤 3 如果粒子适应度优于个体极值 $pbest$,则 $pbest$ 设置为新位置。

步骤 4 如果粒子适应度优于全局极值 $gbest$,则 $gbest$ 设置为新位置。

步骤 5 根据基本粒子群算法更新粒子的速度和位置。

步骤 6 对最优位置 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 进行混沌优化。

(1)将 $p_{gi} (i=1,2,\dots,d)$ 射到 Logistic 方程(3)的定义域 $[0,1]$ 得:

$$z_i = (p_{gi} - a_i) / (b_i - a_i) (i=1,2,\dots,d) \quad (6)$$

(2)用 Logistic 方程进行迭代产生混沌变量序列 $z_i^m (m=1,2,\dots)$ 。

(3)把产生的混沌变量序列通过逆映射: $P_i^{(m)} = (P_1^{(m)}, P_2^{(m)}, \dots, P_d^{(m)}) (m=1,2,\dots)$ 返回到原解空间,得:

$$P_g^{(m)} = (P_{g1}^{(m)}, P_{g2}^{(m)}, \dots, P_{gd}^{(m)}) (m=1,2,\dots) \quad (7)$$

步骤 7 在原解空间对混沌变量经历的每一个可行解 $P_g^{(m)}$ 计算其适应值,得到性能最好的可行解 p^* ,用 p^* 取代当前群体中任意一个粒子的位置。

步骤 8 若满足停止条件,则搜索停止,输出全局最优位置,否则返回步骤 3。

上述改进的完全混沌粒子群算法避免了传统粒子群算法的随机性和盲目性,克服了基本的混沌粒子群优化方法的不彻底性,不仅具有良好的全局寻优能力,而且具有精细的局部搜索能力。

由于该算法主要操作都集中在适应度的计算上,可用种群个体适应度计算的时间复杂度作为算法的时间量度,故该

算法的时间复杂度为 $O(m \cdot d \cdot t)$ 。算法的空间复杂度由初始种群所占的空间来度量,其空间复杂度可表示为 $O(m \cdot d)$ 。可见与基本的 PSO 算法相比,算法的时间复杂度与空间复杂度并没有增加。

4 PID 参数整定仿真算例

本文基于 CPSO 算法的 PID 参数整定算法在 Matlab6.5 平台下编程实现,编程时采用实数编码方法,使得算法具有精度高、搜索空间较大的特点。仿真实验中,最大进化代数取 500,种群规模为 50, c_1 、 c_2 取值为 2,计算精度为 10^{-4} 。

为确保所整定的 PID 控制参数会产生良好的阶跃响应曲线和最小的时域性能指标,取适应度函数 $f(\cdot)$ 为性能指标的倒数:

$$f = \frac{1}{(1 - e^{-\beta})(\delta + e_{ss}) + e^{-\beta}(t_s + t_r)} \quad (8)$$

式中, δ 、 e_{ss} 、 t_s 与 t_r 分别为控制系统的最大超调量、稳态误差、调节时间以及上升时间; β 为权重因子,这里取 $\beta=1$ 。

算例 1 选取控制对象为二系统:

$$G_1(s) = \frac{1.6}{s^2 + 2.584s + 1} \quad (9)$$

3 种优化方法所得控制器参数如表 1 所列,控制对象 1 的单位阶跃响应曲线如图 2 所示,其响应性能指标如表 2 所列。

表 1 3 种算法的 $G_1(s)$ 的 PID 控制器优化参数

优化方法	K_P	K_I	K_D
GA	1.0251	0.9386	0.0973
PSO	1.2828	0.9626	0.1200
CPSO	1.7566	1.1986	0.3496

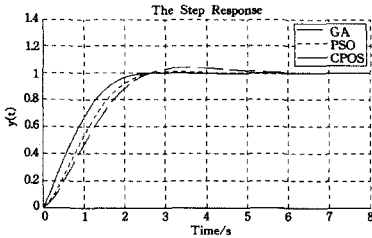


图 2 3 种算法的 $G_1(s)$ 的单位阶跃响应曲线

表 2 3 种算法的 $G_1(s)$ 的响应性能指标

优化方法	t_s	t_r	δ	e_{ss}
GA	4.7442	2.4906	0.0411	0
PSO	2.4347	2.4347	0.0094	0
CPSO	2.1820	2.1820	0	0

由图 2 与表 2 可以看出:(1)采用本文提出的 CPSO 算法所得到的 PID 控制器具有最好的控制效果,响应速度最快,调节时间最短,动态误差也最小,且无超调;(2)采用 PSO 算法获得的控制器控制效果优于 GA,但仍然存在微量的超调;(3)GA 算法的效果最差,超调量最大,调节时间最长。

算例 2 选取控制对象为高阶系统:

$$G_2(s) = \frac{6}{s^4 + 3s^2 + 4s^2 + 3s + 1} \quad (10)$$

3 种优化方法所得控制器参数如表 3 所列,控制对象 2 的单位阶跃响应曲线如图 3 所示,其响应性能指标如表 4 所列。

表 3 3 种算法的 $G_2(s)$ 的 PID 控制器优化参数

优化方法	K_P	K_I	K_D
GA	0.0537	0.0251	0.0120
PSO	0.0619	0.0352	0.0221
CPSO	0.0987	0.0490	0.1071

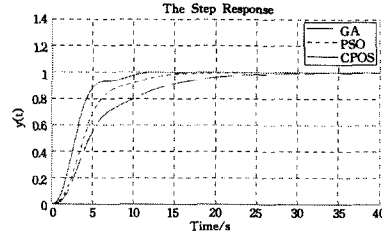


图 3 3 种算法的 $G_2(s)$ 的单位阶跃响应曲线

表 4 3 种算法的 $G_2(s)$ 的响应性能指标

优化方法	t_s	t_r	δ	e_{ss}
GA	23.8181	23.8181	0	0
PSO	14.3717	14.3717	0	0
CPSO	9.6552	9.6552	0	0

由图 3 与表 4 可以看出:(1)CPSO 算法所得到的 PID 控制器的响应速度最快,调节时间最短,无超调,其控制品质明显优于 GA 与 PSO 方法。(2)PSO 方法优于 GA 方法。

算例 3 选取控制对象为二阶惯性加纯滞后系统:

$$G_3(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} e^{-0.5s} \quad (11)$$

3 种优化方法所得控制器参数如表 5 所列,控制对象 3 的单位阶跃响应曲线如图 4 所示,其响应性能指标如表 6 所列。

表 5 3 种算法的 $G_3(s)$ 的 PID 控制器优化参数

优化方法	K_P	K_I	K_D
GA	2.5736	1.4420	1.4977
PSO	2.1984	1.3364	1.2548
CPSO	2.0460	1.0724	1.1831

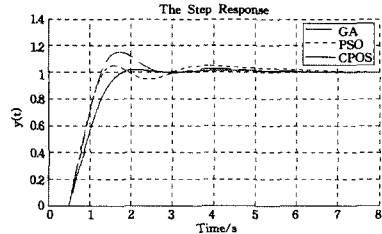


图 4 3 种算法的 $G_3(s)$ 的单位阶跃响应曲线

表 6 3 种算法的 $G_3(s)$ 的响应性能指标

优化方法	t_s	t_r	δ	e_{ss}
GA	4.5531	1.2496	0.1526	0
PSO	4.9770	1.4647	0.0924	0
CPSO	1.6763	1.6763	0.0191	0

由图 4 与表 6 可以看出:(1)CPSO 算法所得到的 PID 控制器的上升时间稍长,但调节时间和超调量最小,其控制品质明显优于 GA 与 PSO 方法。(2)PSO 方法的性能介于 CPSO 与 GA 方法之间,GA 方法的性能最差。

结束语 本文提出的改进混沌粒子群算法较好地发挥了混沌搜索的伪随机性与遍历性的特点,克服了传统混沌粒子群优化方法的不彻底性,避免了盲目性的随机搜索,使优化算法不仅具有良好的全局寻优性能,而且具有精细的局部搜索

能力。二阶、高阶以及二阶惯性加纯滞后等3种典型控制系统的PID控制器参数整定仿真实验结果表明,本文所提方法的优化性能明显优于粒子群算法与遗传算法,可以得到更优的PID控制参数。需要指出的是,理论与实验研究表明,本方法参数优化的时间稍长,如何缩短最佳参数的搜索时间将是下一步分析与研究的问题。

参考文献

- [1] 郭大庆,李晓,赵永进. 基于改进 PSO 算法的 PID 参数自整定[J]. 计算机工程, 2007, 38(18): 202-204
- [2] 林军,倪宏,孙鹏,等. 一种采用神经网络 PID 控制的自适应资源分配方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 112-117
- [3] 姜杉,冯文浩,杨志永,等. 基于模糊 PID 调节的核磁兼容机器人气动控制技术[J]. 机器人, 2012, 34(5): 532-538
- [4] 傅晓云,方旭,杨钢,等. 基于遗传算法的 PID 控制器设计及仿真[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 1-5
- [5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Network, Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948
- [6] Jaafar H I, Mohamed Z, Abidin A F Z, et al. PSO-tuned PID controller for a nonlinear gantry crane system[C]// Proceedings-2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2012). Penang, Malaysia, IEEE, 2013: 515-519
- [7] 胡海兵,胡庆波,吕征宇. 基于粒子群优化的 PID 伺服控制器设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(12): 2144-2148
- [8] Bergh F V D. An Analysis of Particle Swarm Optimizers [D]. Pretoria: University of Pretoria, 2001
- [9] 李兵,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615
- [10] 张国平,王正欧,袁国林. 求解一类组合优化问题的混沌搜索法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 45(7): 49-51
- [11] 叶吉祥,徐玉良. 基于混沌 PSO 算法的求解电力公司最优报价策略研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(2): 149-153
- [12] 高尚,杨静宇. 混沌粒子群优化算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 266-269
- [13] 朱红求,阳春华,桂卫华,等. 一种带混沌变异的粒子群优化算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 215-217
- (上接第 268 页)
- [22] Mohring R H, Schilling H, Schutz B, et al. Partitioning graphs to speedup dijkstra's algorithm[J]. Experimental and Efficient Algorithms, 2005, 3503: 189-202
- [23] Bast H, Funke S, Matijevic D. TRANSIT: Ultrafast Shortest-Path Queries with Linear-Time Preprocessing [C]// Proc. of Proc. 9th DIMACS Implementation Challenge. 2006: 1-13
- [24] Bauer R, Delling D. SharC: Fast and robust unidirectional routing [J]. ACM Journal of Experimental Algorithms, 2009, 14(4)
- [25] Botea A. Improving AI Planning and Search with Automatic Abstraction[D]. Canada: University of Alberta, Edmonton, 2006
- [26] Kishimoto A, Fukunaga A, Botea A. On the scaling behavior of hda* [C]// Proceedings of the Third Annual Symposium on Combinatorial Search SoCS-2010. Stone Mountain, Atlanta, GA, USA, 2010
- [27] Car A. Hierarchical Spatial Reasoning: Theoretical Consideration and Its Application to Modeling Way Finding[D]. Vienna: Department of Geo-information, Technical University of Vienna, 1997
- [28] 李楷,钟耳顺,曾志明,等. 基于分层网络拓扑结构的最优路径算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(7): 1004-1009
- [29] 陆锋,周成虎,万庆. 基于层次空间推理的交通网络行车最优路径算法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 226-232
- [30] 翁敏,毋河海,李林燕. 层次空间推理的机制及其在路径寻找方面的应用[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 119-121
- [31] Weng S J M, Qu R. Hierarchical spatial reasoning and case of way-finding[J]. Geo-spatial Information Science, 2008, 11(4): 269-272
- [32] Zhang Ling, He Fu-gui, Zhang Yan-ping, et al. A New Algorithm for Optimal Path Finding in Complex Networks Based on the Quotient Space[J]. Fundamenta Informaticae, 2009, 93(4): 459-469
- [33] 张燕平,罗斌,姚一豫,等. 商空间与粒计算: 结构化问题求解理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [34] He Fu-gui, Zhang Yan-ping, Zhao Shu, et al. Computing the Point-to-Point Shortest Path: Quotient Space Theory's Application in Complex Network [C]// Yu J, et al., eds. RSKT 2010, LNAI 6401. Springer, Heidelberg, 2010: 751-758
- [35] He Fu-gui, Zhang Yan-ping, Chen Jie, et al. Path Queries on Massive Graphs Based on Multi-granular Graph Partitioning [C]// Yao J T, et al., eds. RSKT 2011, LNCS 6954. Springer, Heidelberg, 2011: 569-578
- [36] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [37] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442
- [38] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [39] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7821-7826
- [40] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113
- [41] Newman M E J. Modularity and community structure in networks[J] Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(23): 8577-8582
- [42] Wang L, Dai G Z. Community finding in complex networks: theory and applications[J]. Science & Technology Review, 2005, 23(8): 62-66
- [43] Bellman R. On a routing problem[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1958, 16(1): 87-90
- [44] Hai Zhu-ge, Zhang Jun-sheng. Topological centrality and its e-Science applications[J]. JASIST, 2010, 61(9): 1824-1841
- [45] 涂文燕,赫南,李德毅,等. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241-2254