

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0004.003

基于 PSO 的 PID 参数整定仿真与研究*

禹威威, 申 远, 徐小丽, 王园园

(合肥师范学院 电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要:针对工业控制过程中经验 PID 整定耗时耗力、精度低且稳定性能差等问题进行研究,提出采用标准粒子群算法可实现对 PID 控制器参数的快速优化且收敛效果明显;通过重点分析 PSO 算法中的不同惯性权重以及学习因子分别对被控对象系统控制优化性能的影响,深入研究算法参数各部分的作用及其设置范围,使基于 PSO 算法的 PID 整定方法能够获得最优的控制效果及更广阔的应用前景;最后,应用 Matlab 软件平台,并结合 Simulink 系统进行算例数字仿真分析;通过对比不同惯性权重及学习因子情况下的仿真结果,证明方法的鲁棒性强;通过对比传统 Z-N 方法和遗传算法整定,证明了方法的优越性。

关键词:PID 控制;标准粒子群算法;参数整定;惯性权重;学习因子

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-058X(2020)04-0014-06

0 引 言

随着工业自动化的不断发展,研究学者对 PID 控制器^[1-3]的研究也在不断深入和发展。由于在控制器设计和应用过程中,同时受到参数选取、被控对象系统参数以及工况的影响,但在系统控制性能优化中又以其参数的优化最为重要^[4]。

目前,文献[5]中,应用比传统 Z-N 整定优越的在线辨识过程对象基于 Z-N 的自适应方法整定 PID 控制器参数。文献[6]提出了基于梯形隶属函数的模糊切换算法及仿人智能思想的优化改进算法,使算法整体得到更好的控制效果的同时使隶属函数规则更复杂,降低了算法精度。文献[7]在传统遗传算法基础上做改进,在交叉、变异环节做自适应处理,但同时也增加了过程的计算量,解码过程也相当复杂。因此可知,文献[5-7]虽然使控制器具

有理想的效果,但优化过程复杂,计算量大,且耗时耗力。

同时,粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法因其控制过程简单、优化速度快等诸多优点^[8-9],受到众多研究者的青睐。文献[10]通过 3 种不同的适应度函数来评估基于 PSO 的 PID 控制系统;文献[11]对比 PSO 算法迭代过程中代数数的 PID 参数整定结果,证明 PSO 算法对比于 Z-N 法整定的简洁和高效。文献[10-11]证明了 PSO 收敛效果明显,非常适用于工业控制过程参数的快速优化,但过程中对算法本身的参数只进行了简单经验式设置,并未深入分析其影响和作用。

综上所述,针对基于 PSO 算法的 PID 参数整定进行研究,分析其自身的优化参数对自身优化性能的影响,通过对比不同惯性权重及学习因子情况下的仿真结果,进一步深入研究各部分的作用,使整定过程的参数选择更合理、更具有优越性,并具有更广阔的工程应用前景。

收稿日期:2019-09-30;修回日期:2019-10-25.

* 基金项目:安徽省科技重大专项(18030901033).

作者简介:禹威威(1991—),女,湖南邵阳人,助理实验师,硕士研究生,从事自动化控制技术研究。

1 基于 PSO 的 PID 控制器的分析

1.1 适应度函数选取

选取绝对误差时间积分(integral time absolute error, ITAE) 指标作为 PID 控制器的性能评价指标,即

$$J_{\min} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1)$$

式(1)中, J_{\min} 越小代表系统性能越好; $e(t)$ 为输出与输入之间的误差; t 为时间。

1.2 基于 PSO 的 PID 控制器分析

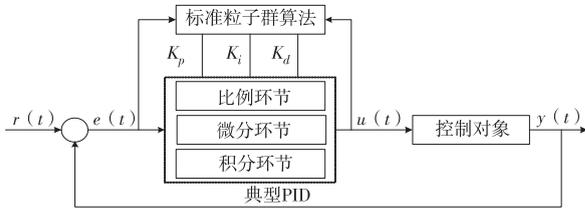


图1 基于 PSO 的 PID 控制器系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of PID controller system based on PSO

典型的 PID 控制器(图1)一般形式可表示为

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

其中, $r(t)$ 、 $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为输入、控制器输出以及系统输出; K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分系数。

在控制系统设计和仿真中,也经常写成传递函数形式:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

其中, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。

2 基于标准 PSO 的 PID 控制器的优化算法设计

2.1 标准粒子群算法分析

关于标准粒子群算法^[12]的粒子更新前/后的速度可表示为 v_i 和 v_{i+1} , 可表示为

$$v_{i+1} = wv_i + c_1 r_1 (P_i^{\text{best}} - x_i) + c_2 r_2 (G_i^{\text{best}} - x_i) \quad (5)$$

其中, w 为惯性权重系数,通常将其设定为线性

递减的形式,如式(6)所示。 w 随着优化迭代增加而改变,主要用于平衡局部优化和全局优化能力; c_1 、 c_2 为加速常数, r_1 、 r_2 为产生的随机数,因此, cr 为 $[0, c]$ 中任意随机数; P_i^{best} 和 G_i^{best} 分别为粒子的个体最优位置和全局最优位置; x_i 表示粒子 x 更新前的位置,其更新公式与最初版本的 PSO 算法^[13]一致,此次不再赘述。

$$w = w_{\max} - \frac{t(w_{\max} - w_{\min})}{t_{\max}} \quad (6)$$

其中, w_{\max} 、 w_{\min} 、 t 和 t_{\max} 分别为最大权重值、最小权重值、当前迭代代数和最大迭代数。

从粒子的更新速度公式可知:

(1) 当 $v_{i+1} = wv_i$ 时,粒子的搜索主要取决于 w 和 v_i ,搜索过程速度方向不改变,使搜索变得盲目,很难找到全局最优。

(2) 当 $v_{i+1} = wv_i + c_1 r_1 (P_i^{\text{best}} - x_i)$ 时,代表此时的粒子搜索具有局部区域信息寻优的能力,但只有当粒子群能搜索到全局最优区域时,局部搜索才能找到最优解,否则容易陷入局部最优。

(3) 当 $v_{i+1} = wv_i + c_2 r_2 (G_i^{\text{best}} - x_i)$ 时,代表此时的粒子通过最优全局信息进行搜索,但在缺乏个体认知的情况下,使得粒子无法在局部区域内找到最优解。

综上所述的3个部分别代表历史速度、个体认知和社会认知,缺一不可,共同决定了粒子的移动的方向和步长。其中的优化参数 w 和 $c_n r_n$,以及粒子群本身的参数(总群数 pop、维度、迭代次数等)均对算法的性能起重要决定作用。

2.2 优化设计过程

基于 PSO 对 PID 控制器的参数进行优化设计,具体流程如图2所示,主要步骤为

步骤1 设置算法初始参数,初始化个体的位置和速度。

步骤2 调用 Simulink 部分的 PID_model 文件,将算法程序中的未知参数依次传递给 PID 控制器的3个参数 K_p 、 K_i 、 K_d ;然后运行控制系统的 PID_model 模型;最后,输出绝对误差时间积分 ITAE,传递至 PSO 算法程序中。

步骤3 初始适应度值极值排序,确定初始个体最优粒子 P_0^{best} 和初始全局最优粒子 G_0^{best} ;确定排

序前 1/4 为初始种群精英个体。

步骤 4 执行速度和位置更新操作,判断和限制粒子更新速度和优化范围,然后调用步骤 2 部分,计算 ITAE,更新最优粒子。

步骤 5 最后根据 ITAE 是否满足条件或是否达到最大迭代次数,若满足条件,则退出算法,得到最优解集;若不满足,则执行步骤 4。

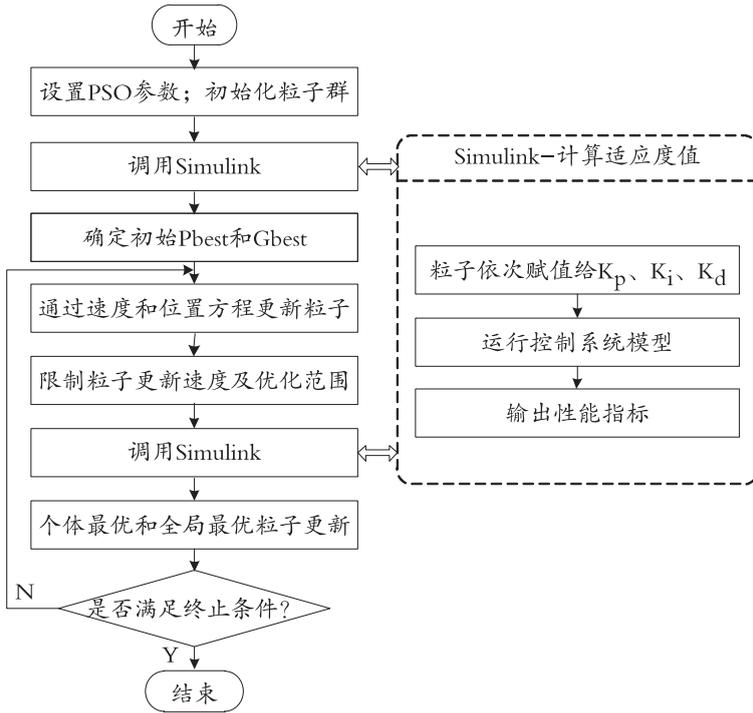


图 2 优化目标函数值计算流程图

Fig. 2 Flow chart of optimization objectives calculation

3 仿真分析及实验对比

3.1 基础数据

通过仿真实验对所提方法进行测试,在仿真分析软件 Matlab 上编写 PSO 算法程序,同时在 Simulink 系统中搭建 PID 模型文件。选取被控对象如下:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

设定的粒子群算法的初始参数如下所示:粒子数 pop 为 100;最大迭代次数为 100; K_p, K_i, K_d 3 个参数的搜索范围为 $[0, 100]$;PID 仿真模型如图 3 所示,输入信号为单位阶跃信号,设置的采样时间间隔为 0.001 s,仿真时间为 20 s。

3.2 实验对比分析

3.2.1 基于 POS 算法的 PID 控制器

为分析研究惯性权重 w 以及加速因子 c 对 PID 整定系统的控制性能的影响。分别以惯性权重 w 和

学习因子 c 为对照量,定义了 4 种不同的场景:惯性权重不变;惯性权重线性减小;加速因子相等;加速因子不相等。

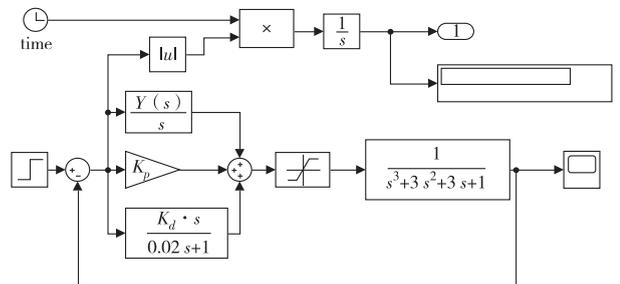


图 3 PID 仿真模型

Fig. 3 The simulation model of PID

(1) 考虑惯性权重 w 的影响 ($c_1 = c_2 = 2$)。场景 I: 分别取 w 为 0.3、0.6、0.9、1.2 四组参数进行实验对比;场景 II: 分别取 w 为 0.9 ~ 0.3、1.2 ~ 0.3 和 1.3 ~ 1.9 三组参数进行实验对比。其中,表 1 为不同惯性权重下 K_p, K_i, K_d 3 个整定参数;表 2 从超调量 $\sigma\%$ 、上升时间 t_r 和 ITAE (绝对误差) 进行比较。

表1 不同惯性权重情况下 PID 参数对比

Table 1 The comparison of PID parameters under different w

场景	惯性权重 w	K_p	K_i	K_d
I	0.3	8.695 9	0.843 9	6.162 1
	0.6	8.728 7	0.844 2	6.178 0
	0.9	12.194 5	0.840 1	8.416 4
	1.2	88.747 9	0.795 4	62.689 9
	0.9~0.3	8.695 9	0.843 9	6.162 1
II	1.2~0.3	8.705 4	0.843 9	6.168 3
	1.2~0.9	33.495 1	0.818 9	21.757 7

表2 不同惯性权重情况下 PID 控制性能对比

Table 2 The comparison of PID control performance under different w

场景	惯性权重 w	$\sigma/\%$	t_r/s	ITAE
I	0.3	24.5	0.837	1.025 5
	0.6	24.6	0.833	1.025 5
	0.9	33.2	0.674	1.046 9
	1.2	71	0.213	1.483 1
	0.9~0.3	24.5	0.837	1.025 5
II	1.2~0.3	24.6	0.836	1.025 5
	1.2~0.9	56.1	0.378	1.114 5

对比表1、表2可知,在一定的迭代次数内,惯性权重为0.3,0.6,其优化效果与惯性权重从0.9线性衰减至0.3和从1.2线性衰减至0.3时的优化效果相差不大,系统输出值偏离稳定值的程度约为24.5%,控制过程首次到达稳定值所需的时间为0.836左右,反映控制过程的稳定性的性能指标ITAE也基本相同,此时的系统控制性能较优。而其余的惯性权重取值,稳定性性能指标ITAE和超调量较大,但系统的上升时间较短,快速性较好。最典型的是惯性权重取值为1.2时,系统的超调量最高,但上升时间最短,快速性最好。

(2) 考虑加速因子的影响($w=0.6$)。场景Ⅲ:当 $c_1=c_2$ 时,取值为3、2.5、2、1.5进行实验对比;场景Ⅳ: c_1 与 c_2 不相等时,取值为 $c_1=3$ 、 $c_2=1.5$; $c_1=1.5$ 、 $c_2=3$; $c_1=2.5$ 、 $c_2=1.5$; $c_1=1.5$ 、 $c_2=2.5$ 四组参数进行实验对比。优化结果如表3、表4所示。

表3 不同加速因子情况下 PID 参数对比

Table 3 The comparison of PID parameters under different c

场景	加速因子 C	K_p	K_i	K_d
III	3	12.433 0	0.862 6	8.198 2
	2.5	10.167 1	0.854 1	6.935 2
	2	8.728 7	0.844 2	6.178
	1.5	8.695 9	0.843 9	6.162 1
	$c_1=3, c_2=1.5$	8.625 2	0.843 9	6.115 5
VI	$c_1=1.5, c_2=3$	8.704 1	0.844 1	6.165 3
	$c_1=2.5, c_2=1.5$	8.691 8	0.843 9	6.162 1
	$c_1=1.5, c_2=2.5$	8.696 4	0.843 9	6.162 4

表4 不同加速因子情况下 PID 控制性能对比

Table 4 The comparison of PID control performance under different c

场景	加速因子	$\sigma/\%$	t_r/s	ITAE
III	3	34.4	0.679	1.060 3
	2.5	29	0.762	1.030 5
	2	24.6	0.833	1.025 5
	1.5	24.5	0.835	1.025 5
	$c_1=3, c_2=1.5$	24.3	0.841	1.025 5
VI	$c_1=1.5, c_2=3$	24.6	0.834	1.025 5
	$c_1=2.5, c_2=1.5$	24.5	0.836	1.025 5
	$c_1=1.5, c_2=2.5$	24.5	0.835	1.025 5

从表3、表4可知,在场景Ⅲ中,当 $c_1=c_2=2.5$ 和 $c_1=c_2=3$ 时,对比其余加速因子取值的优化结果,超调量较高,上升时间较短,系统的稳定性较差,但快速性较好。

综上所述,当惯性权重或学习因子的取值越大时, $\sigma\%$ 越高,系统越振荡,平衡性越差,同时, t_r 也越短,系统反应也越快,快速性更好。

3.2.2 其他算法整定

(1) 采用Z-N法^[14]所述的步骤求取临界增益 K_c 和相应的周期 P_c 。

$$K_c = 8; P_c = 3.627 6$$

代入相应的计算公式,得到:

$$K_p = 4.8; T_i = 1.813 8; T_d = 0.453 45$$

由此设计的PID控制模型为

$$G(s) = 4.8 \left(1 + \frac{1}{1.813 8s} + 0.453 45s \right)$$

(2) 采用GA算法整定,设定其交叉率为0.9,变异率为0.1,其余参数设置与PSO算法相同。可得其

整定参数:

$$K_p = 59.629\ 0; K_i = 0.785\ 6$$

$$K_d = 40.924\ 1; ITAE = 1.242\ 6$$

得到的 Z-N 与 GA 算法的 PID 控制性能如表 5 所示。

表 5 Z-N 与 GA 算法的 PID 控制性能

Table 5 Performance indicators of PID controller between Z-N and GA algorithm

算 法	超调量/%	上升时间/s	ITAE
Z-N	40.5	0.876	3.994 1
GA	65.6	0.268	1.242 6

(3) 对比表 2、表 4、表 5 的性能指标可知, Z-N 法整定的 ITAE 指标最大, 其次为 PSO 整定场景 I 中 w 为 1.2, $c_1 = c_2 = 2$ 得到的优化结果, 再往后就是 GA 算法整定的结果。其余的 PSO 参数设定的 PID 优化整定结果 ITAE 都较小, 系统的控制性能明显优于 Z-N 和 GA 算法整定的结果。

4 结 论

基于 PSO 对 PID 控制器参数进行整定分析与研究。通过数字仿真实验重点对 PSO 算法中的不同惯性权重以及加速因子分别对被控对象系统控制性能的影响进行研究。对比实验证明:

(1) PSO 算法中多种权重系数和学习因子设置均能达到较好的优化控制效果, 鲁棒性能较好。但如何通过具体的权重系数和学习因子设置使系统得到最优的控制效果与评价系统的性能指标, 即是更侧重于稳定性还是快速性, 以及根据系统本身的特点有关, 可作为下一步的研究方向。

(2) 通过与 Z-N 与 GA 算法的 PID 整定对比可知, 基于 PSO 的 PID 整定方法应用过程的参数设置范围广, 且优化控制效果明显优于 Z-N 与 GA 算法的整定结果, 具有一定的工程应用推广价值。

参考文献 (References):

[1] 刘镇, 姜学智, 李东海. PID 控制器参数整定方法综述 [J]. 电力系统自动化, 1997(8): 79—83
LIU Z, JIANG X Z, LI D H. Overview of the Tuning Methods of the PID Controller Parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997(8): 79—83 (in Chinese)

[2] 杨智, 朱海锋, 黄以华. PID 控制器设计与参数整定方法综述 [J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(5): 1—7
YANG Z, ZHU H F, HUANG Y H. Recent Studies of PID Design and Parameter Tuning Method [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(5): 1—7 (in Chinese)

[3] 王勃群, 蔺小林, 汪宁. 基于 Matlab 参数自整定 PID 控制器的设计与仿真 [J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(1): 31—33
WANG B Q, LIN X L, JIANG N. Matlab-Based Auto-Tuning PID [J]. Industry Control and Applications, 2009, 28(1): 31—33 (in Chinese)

[4] 王文庆, 杨楠. 基于改进遗传算法的 PID 参数整定研究 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(12): 2603—2610
WANG W Q, YANG N. Research on PID Parameter Tuning Based on the Improved Genetic Algorithm [J]. Computer and Digital Engineering, 2018, 46(12): 2603—2610 (in Chinese)

[5] 王亚刚, 许晓鸣, 邵惠鹤. 基于 Ziegler-Nichols 频率响应方法的自适应 PID 控制 [J]. 控制工程, 2012, 19(4): 607—609
WANG Y G, XU X M, SHAO H H. Adaptive PID Controller Based on Ziegler-Nichols Frequency Method [J]. Control Engineering of China, 2012, 19(4): 607—609 (in Chinese)

[6] 马小雨. 模糊 PID 复合控制算法的有效改进 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(4): 153—155
MA X Y. Effective Improvement of Fuzzy and PID Compound Control Algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(4): 153—155 (in Chinese)

[7] 刘亚洲, 齐言强, 张志毅. 基于遗传算法的 PID 控制参数研究分析 [J]. 新技术新工艺, 2018(3): 18—21
LIU Y Z, QI Y Q, ZHANG Z Y. Research and Analysis of PID Control Parameter Optimization Based on Genetic Algorithm [J]. New Technology & New Process, 2018(3): 18—21 (in Chinese)

[8] GAING Z L. A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 384—391

[9] 杨智, 陈颖. 改进粒子群算法及其在 PID 整定中的应用 [J]. 控制工程, 2016, 23(2): 161—166
YANG Z, CHEN Y. Improved Particle Swarm Optimization and Its Application in PID Tuning [J]. Control Engineering

- of China, 2016, 23(2): 161—166(in Chinese)
- [10] 唐玉兰, 徐明亮, 梅娟, 等. 粒子群算法在 PID 控制器参数整定中的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(34): 221—224
- TANG Y L, XU M L, MEI J, et al. Research and Application of Particle Swarm Optimization in Parameter Tuning on PID Controller[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(34): 221—224(in Chinese)
- [11] 王玮. 基于 PSO 粒子群算法的 PID 参数整定优化[J]. 科技信息, 2011(13): 515—516
- WANG W. PID Parameter Tuning Optimization Based on Particle Swarm Optimization[J]. Science & Technology Information, 2011(13): 515—516(in Chinese)
- [12] SHI Y H, EBERHART R C. A Modified Particle Swarm Optimizer [J]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, 1998(2):69—73
- [13] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization[J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1995(4): 1942—1948
- [14] 王海英, 袁丽英, 吴勃. 控制系统的 Matlab 仿真与设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009
- WANG H Y, YUAN L Y, WU B. Matlab Simulation and Design of Control System[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009(in Chinese)

Simulation and Research of PID Controller Parameter Tuning Based on PSO

YU Wei-wei, SHEN Yuan, XU Xiao-li, WANG Yuan-yuan

(Anhui Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei Normal University, Anhui Hefei 230601, China)

Abstract: According to the problem in the consumption of time and power, low precision and poor stability for experiential PID tuning in the process of industrial control, this paper proposes to use standard particle swarm optimization (PSO) to realize the rapid optimization of PID controller parameters and obvious effect on convergence. By focusing on the analysis of the influence of different inertia weights and learning factor in PSO algorithm on the control optimization performance of the controlled object system, the function of each part of the algorithm parameters and their setting range are further studied, so that PID tuning method based on PSO algorithm can obtain the optimal control effect and broader application prospect. Finally, by using Matlab software platform and by combining Simulink system to conduct example digital simulation analysis, it is proved that this method is strongly robust based on the comparison of the simulated results of different inertia weights and learning factor and that this method is superior by the comparison of traditional Z-N method and genetic algorithm tuning.

Key words: PID control; standard particle swarm optimization algorithm; parameter tuning; inertia weight; learning factor

责任编辑:田 静

引用本文/Cite this paper:

禹威威, 申远, 徐小丽, 等. 基于 PSO 的 PID 参数整定仿真与研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 14—19

YU W W, SHEN Y, XU X L, et al. Simulation and Research of PID Controller Parameter Tuning Based on PSO[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(4): 14—19