

# 基于改进粒子群优化算法的 PD 参数整定

湛锋, 魏星, 郭建全, 胡志坚, 陈允平

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是近年来出现的一种新型演化计算方法, 其算法简单易懂, 优化性能良好。该文提出改进的 PSO 算法结合 Matlab 强大的矩阵计算和系统仿真功能, 对文中实例的 PD 参数进行了优化整定。仿真显示优化结果比遗传算法好, 收敛性能比遗传算法高。

关键词: 粒子群; 比例积分微分; 优化

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)19-0023-05

## 0 引言

PD 控制是最早发展起来的控制策略之一, 由于其结构简单、容易实现, 控制效果好, 鲁棒性强, 原理简明, 参数物理意义明确, 理论分析体系完整且为工业界所熟悉, 在工业过程控制中至今仍得到广泛的应用 (占 90% 以上), 因而 PD 参数的选择一直是人们感兴趣的问题。从理论上讲, 它是一个优化控制的问题, 从应用上讲, PD 控制器性能的好坏又直接与 PD 参数的选择有重要关系。

PD 参数优化方法分为传统的 PD 参数整定方法和智能 PD 参数整定方法。传统的整定方法如 Ziegler - Nichols 法和庄敏霞与 Atherton 提出的基于 ISTE 性能指标的最优 PD 参数整定算法<sup>[1]</sup>等。传统 PD 整定方法整定过程比较麻烦, 难以实现参数的最优整定, 容易产生振荡和大超调。许多学者提出了各种智能整定 PD 方法, 如遗传算法、模糊推理算法、神经网络学习算法等, 来对 PD 参数进行优化设计。但是这些智能整定方法也还存在某些不足, 如遗传算法要涉及到繁琐的编码解码过程和很大的计算量, 模糊推理方法的参数和神经网络学习方法的隐含层数目、神经元个数以及初始权值这些自身的参数选择都没有系统的方法<sup>[2]</sup>。

同样和遗传算法 (Genetic Algorithm)、蚁群 (Ant Colony Algorithm) 一样, 作为群智能算法的一种的粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法是 1995 年由美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 提出的一种仿生优化算法, 来源于对鸟类和鱼类觅食过程的模拟, 从这一简单社会系统的行为模型中得到启示。粒子群优化算法自提出以来, 在国外得到相关领域众多学者的广泛关注和研究。CEC (Congress on Evolutionary Computation) 国

际年会上, 粒子群优化算法作为一个独立的研究分支, 与遗传算法、进化规划等进化算法相提并论<sup>[3]</sup>。PSO 算法简单且易于程序实现, 具有良好的收敛性能, 因而在许多领域都得到了非常成功的应用, 如神经网络训练、整数规划、minmax 问题、多目标规划等。在电力系统的优化问题上也有了初步的应用研究, 如水火电力系统短期发电计划优化<sup>[4]</sup>、补偿电容器优化配置<sup>[5]</sup>、电力系统机组组合问题<sup>[6]</sup>等。本文对一般的 PSO 算法进行了改进, 利用 PSO 算法优良的寻优能力, 结合 Matlab 强大 Simulink 系统仿真功能, 应用于 PD 参数整定问题上, 并保证系统的稳定性和鲁棒性。

## 1 问题描述

PD 控制器的系统结构图如图 1 所示。

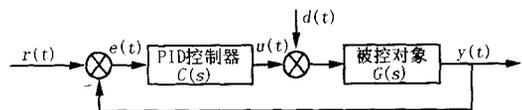


图 1 PD 控制系统框图

Fig 1 PD control system diagram

其中:  $C(s)$  表示 PD 控制器的传递函数;  $G(s)$  表示被控对象的传递函数;  $r(t)$  为系统输入;  $y(t)$  为系统输出;  $e(t)$  为输入输出之间的误差;  $u(t)$  为控制器输出;  $d(t)$  为扰动。

$C(s)$  表示形式为:

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (1)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为 PD 控制器的比例、积分、微分系数。

PD 控制器的输出为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

$G(s)$ 表示工业对象和过程的传递函数。典型的工业过程通常可以表示为近似一阶纯滞后对象或者二阶纯滞后对象,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{Ke^{-s}}{Ts + 1} \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-s}}{s^2 + As + B} \quad (4)$$

式中:表示滞后时间,  $K, A, B, T$ 为过程参数。

PD参数优化整定就是要在  $K_p, K_i, K_d$  的可行域空间内找到某一组控制参数,在满足系统稳定性的前提下,使得某些性能指标最优。常用的性能评价指标有:

$$\left\{ \begin{array}{l} ISE: J = \int_0^+ e^2(t) dt \\ IAE: J = \int_0^+ |e(t)| dt \\ IATE: J = \int_0^+ t |e(t)| dt \\ ISTE: J = \int_0^+ \dot{t}^2 e^2(t) dt \end{array} \right. \quad (5)$$

为了便于比较,本文采用同文献[7]一样的性能评价指标 IATE。

在 PD参数寻优的过程中,除了时域的性能指标外,为了保证系统的稳定性和鲁棒性,还必须保证在频域有一定的幅值和相角裕度。由于 PSO 算法具有很强的搜索能力,故可以把需要优化的参数  $K_p, K_i, K_d$  的寻优范围  $[x_{min}, x_{max}]$  放的大一些,即不用像文献[7]一样在 ZN法整定结果附近。综上所述,系统优化模型可表示为:

$$\min J \quad (6)$$

$$s.t. \left\{ \begin{array}{l} PM \quad [PM_{min}, PM_{max}] \\ GM \quad [GM_{min}, GM_{max}] \\ K_p \quad [K_{pmin}, K_{pmax}] \\ K_i \quad [K_{imin}, K_{imax}] \\ K_d \quad [K_{dmin}, K_{dmax}] \end{array} \right.$$

## 2 粒子群优化算法及其改进

粒子群优化算法 (PSO) 是美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 在研究了鸟类群体行为,并利用了生物学家 Frank Heppner 的生物群体模型,于 1995 年共同提出的继蚁群算法之后又一种群体智能算法 (Swarm Intelligence Algorithm),并最终发展成为一种有效的优化工具<sup>[31]</sup>。同其它演化计算方法一样,也是基于群体的迭代随机搜索算法,

然而它不像其它演化算法 (如遗传算法) 一样,对个体使用演化算子,而是将个体视为无体积的微粒,在搜索空间中变速飞行,其飞行速度根据该微粒本身的历史经验以及同伴的历史经验进行动态调整。

粒子群优化算法涉及到的参数有:群体规模 swam size, 群体维数 swamDim, 最大演化代数 MaxIteration。主要涉及的迭代运算矩阵有:所有微粒的速度空间和位置空间 SwamVMatrix, SwamXMatrix 以及从位置空间映射到实数空间的适应度向量 FitnessVector。

假设在  $d$  维搜索空间中有  $n$  个飞行的微粒,其中第  $i$  个微粒的位置可以用向量表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 其飞行速度表示为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 飞行过程中它所经历的最优位置记为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 相应的适应值称为个体最优解  $pbest_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。粒子群所有粒子中经历过的最好位置记为  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ , 相应的适应值记为  $gbest$ 。每个微粒根据如下公式来更新自己的速度和位置:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ij}^{k+1} = w \cdot v_{ij}^k + r1 \cdot c1 \cdot (p_{ij} - x_{ij}^k) + \\ \quad r2 \cdot c2 \cdot (P_{gi} - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \\ i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, d \end{array} \right. \quad (7)$$

式中:  $w$  为惯性权重,  $r1, r2$  分别为  $[0, 1]$  之间相互独立的一个随机数,  $c1, c2$  为加速常数, 分别称为“认知”加速常数和“社会”加速常数。同时为防止搜索极度无序,微粒飞行速度由最大速度  $v_{max}$  所限制,即当粒子群中某一个微粒速度满足  $v_{ij} > v_{max}$  ( $v_{ij} < -v_{max}$ ) 的时候就限制其为最大值,  $v_{ij} = v_{max}$  ( $v_{ij} = -v_{max}$ )。这里位置更新公式不带飞行时间可以理解为进化一代为单位时间。

由上式可知,微粒的当前飞行速度由三部分组成:第一部分为微粒的先前速度,乘以一个惯性权重表示对自身速度的记忆性;第二部分为“认知”部分,是对自身的思考,表示对自身最好位置的靠近;第三部分为“社会”部分,表示微粒之间的信息共享和相互合作,对群体最好位置的靠近。PSO 算法的心理学基础为:在寻求最好的认知过程中,个体往往记住自己的信念,同时考虑同伴的信念,向自身历史最好看齐,同时向好的同伴学习。

标准粒子群优化算法流程为:

1) 确定微粒规模和微粒维数,初始化一群微

粒,包括随机速度和随机位置。

2) 根据式(7)更新每个微粒的速度和位置。

3) 根据适应度函数评价每个微粒的适应度。

4) 对每个微粒,将其适应度与其自身的历史最好位置  $p_i$  做比较,如果更好就将其作为当前的最好位置  $p_i$ 。

5) 对每个微粒,将其适应度与全局经历的历史最好位置  $p_g$  做比较,如果更好就将其作为全局最好位置  $p_g$ 。

6) 若达到停止条件,则返回当前最优个体和适应值,否则返回第2步。

在标准粒子群优化算法中,惯性权重  $w$  是用来控制历史速度对当前速度的影响程度,平衡 PSO 算法的全局搜索能力和局部搜索能力的。若  $w$  较大,则微粒有能力扩展搜索空间,全局搜索能力强。若  $w$  较小,微粒主要是在当前解的附近搜索,局部搜索能力强;当  $w=0$  时,微粒没有记忆性,根据式(7),它将飞向个体最优位置和全局最优位置的加权中心,而处于全局最优位置的微粒将保持静止。

从寻优的整个过程来看,前期主要是扩展搜索空间,需要较大的  $w$ ;后期主要是在最优解附近精细搜索,需要较小的  $w$ ;所以本文将  $w$  从最大惯性权重到最小惯性权重之间线性减小:

$$w_k = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (k = 1, 2, \dots, k_{\max}) \quad (8)$$

式中:  $w_k$ ,  $w_{\max}$ ,  $w_{\min}$  分别为第次迭代用的惯性权重、最大惯性权重、最小惯性权重。

为了加速收敛,本文采用遗传算法中类似选择(Selection)的思想,优选适应度高的个体。即按照适应度排序,对后面适应度小的 1/4 总体规模的个体用前面适应度大的 1/4 总体规模的个体代替,包括个体速度、位置、适应度值。

在实际问题中,同其它演化算法一样,群体规模就是并行寻优的个体数  $n$ ,一般取 20~30。粒子群维数即需要优化的参数个数  $d$ ,个体位置  $x_i$  即需要优化的参数值。实际问题中参数是有限制的,一种处理方法是作为罚函数加在目标函数后面,但显得麻烦。另一种更直接的方法是类似于对微粒飞行速度限制一样限制其移动范围,即也给定一个  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$ ,若  $x_{ij} > x_{\max}$  就令  $x_{ij} = x_{\max}$ ;若  $x_{ij} < x_{\min}$  就令  $x_{ij} = x_{\min}$ 。经过改进后减少了寻优迭代次数。

粒子群优化算法作为一种进化算法,有许多与

遗传算法类似的地方,同时具有自己独特的特点。同遗传算法相比,相同点都是进化计算方法,都是基于群体的,不断比较适应度函数值的随机寻优过程。不同的是: PSO 算法不需要遗传算法那样需要繁琐的二进制编码解码。PSO 算法不需要交叉、变异等遗传算法操作。PSO 算法可以直接把目标函数作为适应度函数,不需要像遗传算法那样在求解最小值的时候要进行目标函数到适应度函数的转换。PSO 算法需要设置的参数少,只需要根据经验值给定这些参数就可以适应很多问题,不像遗传算法那样需要合适选择交叉率、变异率。从某种意义上讲,PSO 算法比遗传算法更具随机性,更不容易陷入局部最优。PSO 算法在粒子群之间通过群体最优位置单向共享信息,相比遗传算法通过染色体互相共享信息而言,能更快地向全局最优移动。最重要的是粒子群优化算法的计算方法简单却强大,程序容易实现,很多优化问题都可以通过该方法来解决。

### 3 仿真计算

本文拟用 Matlab 强大的矩阵计算能力,并结合 Simulink 完善的系统仿真功能,交互地进行 PD 参数寻优计算。

#### 1) 仿真算例

为了便于比较,被控对象的传递函数选为与文献[7]一样:

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)^2} \quad (9)$$

Simulink 仿真模型如图 2 所示。在 Simulink 模型中设置 PD Controller 的三个参数分别为工作空间中的三个变量  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ,延时环节延时 0.5,采用 4 阶 pade 线性化模型,其它设置如图所示。PSO 算法参数设置为:种群规模 20,微粒维数 3 (对应  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三个变量),最大迭代次数 100,惯性权重从 0.95 到 0.1 线性减小,加速常数  $c1=2.0$ ,  $c2=2.0$ ,微粒速度范围  $[-10, 10]$ ,微粒位置范围  $[0, 5]$ 。

#### 2) 仿真结果

采用不同优化方法得出的参数及在该参数下系统的性能指标如表 1 所示。改进 PSO 算法的收敛曲线如图 3 所示,不同优化方法得出的参数对应的系统单位阶越响应曲线见图 4。

表 1 不同 PD 设计方法对应参数和性能指标

Tab 1 Parameters and performance based on different PD design method

PD设计方法	$K_p$	$K_i$	$K_d$	%	$t_s$	$G_m$	$P_m$	ITAE
改进 PSO算法	2 695 3	0 782 6	1 504 4	3 07	3 790	2 173 7	57 994 4	1 028 00
GA - ITAE	2 773	0 813	1 490	5 64	3 810	2 154 2	55 832 2	1 05
GA - ISTE	2 984	0 848	1 585	8 25	3 806	2 011 7	51 499 4	1 087 7
ZN	2 813	1 719	1 151	43 1	5 131	2 37	40 030	2 591
ISTE	1 648	0 843	0 659	15 17	5 635	4 0418	60 558 2	2 469 5
AP	2 387	0 875	0 948	5 1	4 77	2 778 8	55 281 9	1 540

注:其中  $t_s$  为进入稳态 2% 的系统调节时间。

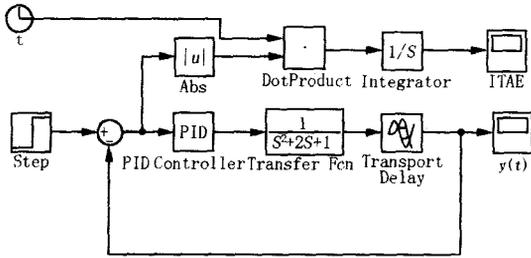


图 2 PD 仿真模型

Fig 2 PD simulation model

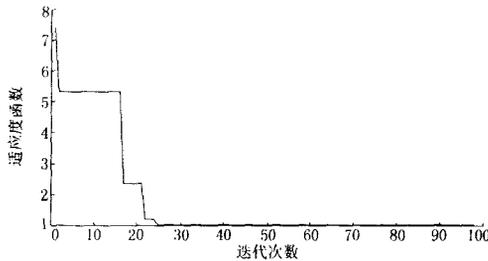


图 3 适应度函数收敛图

Fig 3 Fitness function convergence diagram

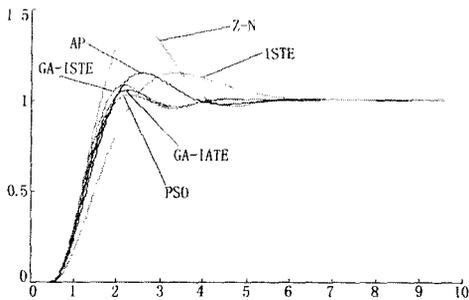


图 4 不同整定方法所得参数单位阶跃响应曲线

Fig 4 Step response of different optimization method

从表 1 和图中可知,改进 PSO 算法能有效地找到优化结果,不仅满足 ITAE 性能指标比其它方法得到的结果更优,超调量和调节时间也都比其它的好。幅值和相位裕度都比上面的遗传算法结果大(虽然比 ZN、ISTE 和 AP 方法部分结果差,但这三种方法的 IATE 性能指标显然太大),即系统的鲁棒性能更好。以上表明,改进 PSO 算法用于 PD 参数整

定,不仅结果更优,满足系统稳定性和鲁棒性,而且收敛性能也很好。

同时,遗传算法求解该问题最优结果出现的平均代数数为 97<sup>[7]</sup>,PSO 算法求解得到最优结果的代数均在 50 次以下,有些情况下甚至更好,如上面显示的是 25 次。而且遗传算法不是针对问题直接求解的,需要把  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三个参数的搜索范围和精度编码,并把搜索的结果解码。而 PSO 算法就直接在问题的可行域中搜索求解,从这个意义上讲,PSO 算法更具随机性,能更直接地搜索到问题的最优解,不容易陷入局部最优。PSO 算法需要设置的参数就直接取  $c_1 = 2.0$ ,  $c_2 = 2.0$ ,惯性权重从 1.0 左右线性减少到 0.1 左右就可以了,这个参数可以针对绝大多数利用 PSO 算法求解的问题中,不像遗传算法那样需要合适选择交叉率、变异率,即更具有通用性。

#### 4 结论

PSO 算法是一种新型的演化计算方法,其算法简单,参数较少,优化性能好。通过分析其优化的原理,将改进 PSO 算法应用于 PD 参数整定中,获得了良好的优化效果和很好的收敛特性。通过与 Z-N、ISTE、遗传算法相比,可以看出改进 PSO 算法能获得更优解,系统性能指标也有了提高。

在算法程序方面,PSO 优化算法采用专业的 Matlab 语言,利用其强大的矩阵运算功能和简单可靠的函数调用功能,程序简单易懂。在利用与 Simulink 仿真交互运算方面,利用了 Simulink 简单、准确而强大的仿真功能和程序共享工作空间的特点,系统框图简单明了,扩展性强,稍微改一下就可以用于其它模型的参数优化上。

综上所述,本文提出的将改进粒子群优化算法结合 Matlab 和 Simulink 仿真来优化 PD 参数的方法不仅获得了优良的整定结果和收敛性能,而且简单易懂,方便推广到其它更复杂的电力系统优化问题上,是一种有效的系统优化技术。

## 参考文献:

- [1] 陶永华,尹怡欣,葛芦生. 新型 PD控制及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,1998  
TAO Yong-hua, YN Yi-xin, GE Lu-sheng New PD Control and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [2] 刘益剑,张建明,王树青. 基于 PSO算法的 PD控制器参数优化设计 [A]. 第五届全球智能控制与自动化大会. 2003. 248-250  
LU Yi-jian, ZHANG Jian-ming, WANG Shu-qing PD Controller Parameter Optimization Design Based on PSO Algorithm [A]. The 5th World Congress on Intelligent Control and Automation 2003. 248-250
- [3] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法 [M]. 北京:科学出版社,2004  
ZENG Jian-chao, JIE Jing, CUI Zhi-hua Particle Swarm Algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2004
- [4] 汪新星,张明. 基于改进微粒群算法的水火电力系统短期发电计划优化 [J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 20-24  
WANG Xin-xing, ZHANG Ming Short-term Scheduling Optimization of Hydro-thermal Power Systems Based on Refined Particle Swarm Algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 20-24
- [5] 余欣梅,李妍,熊信银,等. 基于 PSO考虑谐波影响的补偿电容器优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 30-34  
YU Xin-mei, LI Yan, XIONG Xin-yin, et al Optimal Shunt Capacitor Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmonic Distortion Consideration [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (2): 30-34
- [6] 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): 28-32  
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia A Hybrid Particle Swarm Optimization Method for Unit Commitment Problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 28-32
- [7] 郑力新,周凯汀,王永初. PD进化设计 [J]. 仪器仪表学报, 2001, (4): 12-15.  
ZHENG Li-xin, ZHOU Kai-ting, WANG Yong-chu PD Evolution Design [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, (4): 12-15.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [J]. Proc IEEE Int Conf Neural Networks, 1995: 1942-1948
- [9] 刘康,余玲. 一种仿生优化方法——微粒群算法 [J]. 四川轻工业学院学报, 2003, 16 (1): 1-2  
LU Kang, YU Ling An Evolutionary Optimal Method——Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology, 2003, 16 (1): 1-2
- [10] 汪新星,张明. 利用改进微粒群算法优化 PD参数 [J]. 自动化仪表, 2004, (2): 9  
WANG Xin-xing, ZHANG Ming Optimizing PD Parameters by Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Process Automation Instrumentation, 2004, (2): 9
- [11] 周凯汀,郑力新. 基于遗传算法的 PD参数优化设计 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2000, 21 (2): 200-204  
ZHOU Kai-ting, ZHENG Li-xin Optimization Design Based on Genetic Algorithm for Designing Parameters of PD Controller [J]. Journal of Huaqiao University, Natural Science, 2000, 21 (2): 200-204

收稿日期: 2005-02-05; 修回日期: 2005-03-01

## 作者简介:

湛 锋 (1981 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为小波分析在电力系统中的应用,电力系统稳定控制; E-mail: whuster@sina.com

魏 星 (1980 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统智能控制与在线检测;

郭建全 (1980 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

## PD parameters tuning based on improved PSO algorithm

ZHAN Feng, WEI Xing, GUO Jian-quan, HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping

(Department of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Particle swarm optimization (PSO) is a new evolutionary computation method with simple algorithm and excellent optimization performance of Matlab recently. In this paper, improved PSO is used to optimize PD parameters of the example in the paper combining with powerful matrix computing and system simulation functions. Simulation shows that its optimization result and convergence performance are better than that of genetic algorithm.

**Key words:** PSO; PD; optimization