

微粒群优化算法

陈国初, 俞金寿

(华东理工大学自动化研究所, 上海 200237)

摘要:介绍了微粒群优化(PSO)算法的原理、算法流程、算法参数及其对算法性能的影响。讨论了各种改进的 PSO 算法, 分析了多相微粒群优化算法(MPPSO)的原理、算法方程、算法参数及其对算法性能的影响。最后归纳了 PSO 算法的应用概况, 并就 PSO 算法进一步的研究工作进行了探讨和展望。

关键词:进化计算; 微粒群优化算法; 多相微粒群优化算法; 优化

中图分类号:TP273

文献标识码:A

Particle Swarm Optimization Algorithm

CHEN Guo-chu, YU Jin-shou

(Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: This paper introduces and analyzes systematically the principle, process and parameters of particle swarm optimization (PSO) algorithm, and their influence on optimization performance of PSO. Various improved particle swarm optimization algorithms are discussed. The algorithm principle and algorithm parameters of multi-phase particle swarm optimization (MPPSO) algorithm, and their influence on optimization performance of MPPSO are analyzed. At last, applications of PSO algorithm are discussed, and further research issues and some suggestions are given.

Keywords: evolutionary computation; PSO algorithm; MPPSO algorithm; optimization

1 引言(Introduction)

微粒群优化算法(Particle Swarm Optimization algorithm, PSO)是由 Kennedy J 和 Eberhart R C^[1,2] 于 1995 年提出的一种新的进化计算算法。由于 PSO 概念和参数调整都很简单而且容易编程实现, 它既保持传统进化算法深刻的群体智慧背景, 同时又有自己许多良好的优化性能。因此, PSO 一经提出, 立刻引起进化计算领域学者们的广泛关注, 短短几年便获得快速发展, 在诸多领域得到应用而且应用范围越来越广泛, 已形成学术界一个新的研究热点。本文首先介绍 PSO 的基本原理、算法流程和算法参数分析及常见的改进 PSO; 然后介绍多相微粒群优化算法(Multi-Phase Particle Swarm Optimization algorithm, MPPSO)的原理和参数分析; 最后归纳 PSO 的应用情况并就 PSO 进一步的研究工作进行探讨和展望。

2 基本 PSO(Basic PSO)

2.1 算法原理

假设在 D 维搜索空间中, 有 m 个微粒组成一个微粒群, 其中第 i 个微粒的空间位置为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, m$, 它是优化问题的一个潜在解, 将它代入优化目标函数可以计算出相应的适应值, 根据适应值可衡量 x_i 的优劣; 第 i 个微粒所经历的最好位置称为其个体历史最好位置, 记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iD})$; 同时, 每个微粒还具有各自的飞行速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$ 。所有微粒经历过的位置中的最好位置称为全局历史最好位置, 记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}, \dots, p_{gD})$, 相应的适应值为全局历史最好适应值 F_g 。对每一代微粒, 其第 d 维($1 \leq d \leq D$)根据如下方程迭代:

$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

其中: ω 为惯性权值(inertia weight); c_1 和 c_2 都为正常数, 称为加速系数(acceleration coefficient); r_1 和 r_2 是两个在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数。

搜索时,微粒的位置被最大位置和最小位置限制,如果某微粒在某维的位置超出该维的最大位置或最小位置,则该微粒的位置被限制为该维的最大位置或最小位置。同样,微粒的速度也被最大速度和最小速度所限制。

式(1)的第1部分由微粒先前速度的惯性引起,为“惯性”部分;第2部分为“认知”部分,表示微粒本身的思考,即微粒本身的信息对自己下一步行为的影响;第3部分为“社会”部分,表示微粒间的信息共享和相互合作,即群体信息对微粒下一步行为的影响。

2.2 算法流程

基本 PSO 算法流程如下:

① 初始化设置微粒群的规模、惯性权值、加速系数、最大允许迭代次数或适应值误差限,各微粒的初始位置和初始速度等。

② 按目标函数评价各微粒的初始适应值。

③ 根据公式(1)计算各微粒新的速度,并对各微粒新的速度进行限幅处理。

④ 根据公式(2)计算各微粒新的位置,并对各微粒新的位置进行限幅处理。

⑤ 按目标函数重新评价各微粒的适应值。

⑥ 对每个微粒,比较其当前适应值和其个体历史最好适应值,若当前适应值更优,则令当前适应值为其个体历史最好适应值,并保存当前位置为其个体历史最好位置。

⑦ 比较群体所有微粒的当前适应值和全局历史最好适应值,若某微粒的当前适应值更优,则令该微粒的当前适应值为全局历史最好适应值,并保存该微粒的当前位置为全局历史最好位置。

⑧ 若满足停止条件(适应值误差达到设定的适应值误差限或迭代次数超过最大允许迭代次数),搜索停止,输出搜索结果。否则,返回③继续搜索。

2.3 参数分析

基本 PSO 的参数主要有惯性权值和加速系数。

(1) 惯性权值 ω

ω 对 PSO 能否收敛起重要作用,它使微粒保持运动惯性,使其有扩展搜索空间的趋势,有能力探索新的区域。 ω 值大些有利于全局搜索,收敛速度快,但不易得到精确解; ω 值小些有利于局部搜索和得到更为精确的解,但收敛速度慢且有时会陷入局部极值。合适的 ω 值在搜索精度和搜索速度方面起协调作用。

(2) 加速系数 c_1, c_2

c_1 和 c_2 对 PSO 的收敛速度影响颇大,合适的加速系数有利于算法较快收敛和脱离局部极值。它们代表将每个微粒推向其个体历史最好位置和全局历史最好位置的统计加速项的权值。低的加速系数值允许微粒在被拉回之前可以在目标区域外徘徊,而高的加速系数值则可能导致微粒突然地冲向或越过目标区域。

在公式(1)中,若 $c_1 = c_2 = 0$,微粒将一直以当前的速度惯性飞行,直到到达边界;由于它只能搜索有限的区域,所以很难找到最好解。若 $c_1 = 0$,则微粒没有认知能力,只有社会部分,所以 c_2 又称为社会参数;此时收敛速度比基本 PSO 快,但对复杂问题,则比基本 PSO 容易陷入局部极值。若 $c_2 = 0$,则微粒之间没有社会信息共享,只有认知部分,所以 c_1 又称为认知参数;此时个体间没有交互,一个规模为 m 的群体等价于 m 个单个微粒的运行,得到最好解的机率非常小。

通常, $c_1 = c_2 = 2$ 。也有实验结果显示,当 $c_1 = c_2 = 0.2$ 时能取得更好的效果。最近一些研究^[3]还表明认知参数 c_1 选择的大些而社会参数 c_2 选择的小些,但 $c_1 + c_2 \leq 4$ 时能得到更好的结果。

此外,随机数 r_1, r_2 可以保证微粒群体的多样性和搜索的随机性。最大最小速度可以决定当前位置与最好位置之间区域的分辨率(或精度)。如果最大速度太高或最小速度太低,微粒可能会飞过好解;如果最大速度太小或最小速度太大,则微粒不能在局部最好区间之外进行足够的探索,导致陷入局部极值。该限制的目的主要是防止计算溢出,改善搜索效率和提高搜索精度。

3 改进的 PSO (Improved PSO)

作为一种高效的并行优化算法,PSO 发展很快,出现了很多改进的 PSO。

3.1 自适应 PSO

较大的惯性权值 ω 有利于搜索时跳出局部极值点,而较小的 ω 有利于算法收敛和提高搜索精度。最初版本的 PSO 中, ω 为常数。后来,文献[4]提出了 ω 的自适应调整策略,刚开始时 ω 较大,随着迭代的进行, ω 线性减小。文献[5]认为刚开始 $\omega = 1.4$,然后逐步减小到 $\omega = 0.35$ 比较合适。这种方法的进一步发展是模糊自适应 PSO (fuzzy adaptive PSO)^[6],它用自适应模糊惯性权值控制器来动态优化 ω 。

自适应 PSO 对许多问题都能取得满意的结果,

但是对许多复杂的非线性优化问题,试图通过自适应调整一个全局系数提高搜索精度的余地是有限的,而且这种方法在实现时有一定困难.

3.2 带收缩因子的 PSO

文献[7]提出一种带收缩因子的 PSO. 其微粒速度迭代方程为:

$$v_{id} = \chi \cdot (\omega v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id})) \quad (3)$$

式中, $\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}$ 称为收缩因子, $\varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4$.

类似惯性权值,收缩因子可以改善算法的收敛性;但在控制微粒速度变化的幅度上,收缩因子不同于惯性权值,而是类似于最大速度限. 有实验表明^[8],在没有最大速度限时,带收缩因子的 PSO 比不带收缩因子的 PSO 具有更好的性能.

3.3 带选择机制的 PSO

基本 PSO 没有选择机制,微粒个体不会被别的微粒个体所取代,迭代时,每个微粒不断地改变自己的位置直到搜索结束.

文献[9]提出一种带选择机制的 PSO. 这种算法依据某些预定的规则,将每个个体的适应值,基于其当前位置,与其它个体进行比较,然后根据定义的规则将所有个体排序,得分最高的出现在群体的前面. 一旦群体排序完毕,群体中当前得分低的一半被群体中当前得分高的另一半取代. 带选择机制的 PSO 在解决单峰函数的优化问题时效果明显,但并不一定对所有的优化问题都很有效. 这种算法由于有了选择机制,加快了对当前较好区域的开发过程,使得收敛速度较快,但也增加了陷入局部极值解的可能性.

借鉴遗传算法的思想,文献[10]最早提出了杂交 PSO 的概念. 文献[11]将基本 PSO 和选择机制相结合,进一步提出具有繁殖和子群的杂交 PSO (Hybrid PSO, HPSO). 杂交 PSO 的选择机制与遗传算法十分相似. 该法按预定的准则,给微粒群中的每个微粒赋予一个繁殖概率,在每次迭代中,依据繁殖概率的高低选取一定数量的微粒放入一池中. 池中的微粒随机地两两杂交,产生与父代微粒数目相同的子代微粒,并用子代微粒代替父代微粒,以保持种群的微粒数目不变. 子代微粒的位置由父代微粒位置的算术加权和计算. 实验结果^[10,11]显示,杂交 PSO 的收敛速度比较快,搜索精度相对比较高,对一些非线性优化问题可以得到满意的结果,尤其是对多峰值

函数优化问题具有更好的性能.

3.4 带空间邻域的 PSO

Angeline 的研究^[10]表明,尽管 PSO 能比其它进化算法更快地得到较为理想的解,但当迭代次数增加时,并不一定能进行更精确的搜索. 为此,可引入一个变化的邻域算子 (neighborhood operator), 在迭代的初始阶段,一个微粒的邻域就是它本身;随着迭代的进行,根据候选个体与邻域中心的距离,逐步引入距离近的个体,邻域逐渐变大,包含越来越多的微粒,最后包含所有的微粒. 这样,原来的全局历史最好位置搜索就变成了微粒邻域的局部历史最好位置搜索. 文献[12]更为详细的资料 and 许多测试函数的仿真结果表明这一方法能有效地获得全局最优解.

结合空间邻域和环状拓扑结构,文献[13]进一步提出具有社会模式 (social stereotyping) 的聚类分析 PSO (PSO with cluster analysis). 该法将微粒群体中的一些微粒作为中心,再将离它最近的 N 个微粒和中心微粒作为一簇,然后计算每个簇的中心位置,并用这些中心位置替代个体历史最优位置和全局历史最优位置. 但文献[13]所示的研究结果并没表明这一方法具有更好的性能,结果难以令人满意,还有许多问题有待于进一步研究.

3.5 离散 PSO

基本 PSO 最初是用来对连续函数进行优化的. 而许多实际问题是组合优化问题,因此, Kennedy 和 Eberhart 在基本 PSO 的基础上发展了离散二进制 PSO^[14]来解决这一类问题.

离散二进制 PSO 与基本 PSO 的主要区别在于运动方程 (公式(1)、(2)), 离散二进制 PSO 的运动方程如下:

$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (4)$$

如果 $\rho_{id} < \text{sig}(v_{id})$ 那么 $x_{id} = 1$; 否则 $x_{id} = 0$ (5)

式(5)中, $\text{sig}(v_{id}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id})}$ 是 sigmoid

函数; $\rho_{id} \in [0, 1]$ 是随机 ρ_i 矢量的第 d 维分量. 微粒的位置只有 $[0, 1]$ 两种状态,而速度与某一概率的门限值相关,速度值越大,则微粒位置取 1 的可能性越大,反之越小. 在公式(4)中,为防止速度过大,可以设置最大速度使函数不会过于接近 0 或 1,以保证算法能以一定的概率从一种状态跃迁到另一种状态. 可以看出,除了公式(5)不同,离散二进制 PSO 与基本 PSO 几乎一样.

为了解决实际的组合优化问题,文献[15]进一步推广了离散二进制 PSO,提出了离散版的 PSO,并

将其应用于旅行商问题(TSP)的求解,取得了较好的效果.离散 PSO 扩展了基本 PSO 的应用领域,给组合优化问题的求解带来更好的应用前景.

3.6 有拉伸功能的 PSO

拉伸变换函数最早由 Vrahatis 于 1996 年提出^[16],然后 Parsopoulos 和 Plagianakos 于 2001 年将拉伸技术用于 PSO 最小化问题的求解^[17],形成有拉伸功能的 PSO,也称为 SPSO,它通过消除不理想的局部极小而保留全局最小来避免陷入局部极小.

SPSO 在检测到目标函数 $f(x)$ 的局部极小点 \bar{x} 后,立即对待优化的目标函数进行拉伸变换.拉伸变换操作的实现通过两步完成^[18]:

$$G(x) = f(x) + \gamma_1 \|x - \bar{x}\| \cdot (\text{sign}(f(x)) - \text{sign}(f(\bar{x}))) + 1 \quad (6)$$

$$H(x) = G(x) + \gamma_2 \frac{\text{sign}(f(x) - f(\bar{x})) + 1}{\tanh(\mu(G(x) - G(\bar{x})))} \quad (7)$$

其中 γ_1, γ_2, μ 为任意的正常数, $\text{sign}(\cdot)$ 是三值符号函数.这一变换,首先通过式(6)的操作提升目标函数 $f(x)$,消除了所有位于 $f(\bar{x})$ 之上的局部极小区域;然后,通过式(7)的操作将邻域向上拉伸,使得该点具有更高的适应值.由于在两步操作中,都没有改变下部的局部极小区域,因此对全局最小值没有影响,从而减小了 PSO 陷入局部极小区域的概率.文献[17]的研究结果表明,SPSO 具有稳健的收敛性和良好的搜索能力,与基本 PSO 相比,在很多高维度、多局部极值的函数最小值的求解问题上,搜索成功率显著提高.但计算耗时相应地也会增多.

除了以上几类改进的 PSO 外,还有随机 PSO (random PSO)^[19]、多次启动 PSO (multi-start PSO)^[19] 和智能 PSO (intelligent PSO)^[20] 等等.

4 多相微粒群优化算法(MPPSO)

MPPSO 是 Buthainah A 等^[18]于 2002 年提出的 PSO 的扩展算法.

4.1 算法原理

PSO 在搜索时有两个弱点:①和它的随机算法一样,为了不易陷入局部极值,扩大搜索空间的范围,导致相当多的计算量用在差适应值的状态的搜索上;②微粒一直不断地朝一个方向运动,直到这个方向被改变,这很容易导致微粒收敛于适应值差的局部极值点.

如果将微粒群分成两组,每一组有自己的搜索目标,一组以全局最好为搜索目标,另一组以局部最好为搜索目标.一旦搜索受阻,适应值得不到改善而

又不能满足要求,就允许微粒改变搜索方向,即允许进行局部最优搜索的微粒进行全局最优搜索,也允许进行全局最优搜索的微粒进行局部最优搜索.假定进行全局最优搜索的速度和进行局部最优搜索的速度方向相反.这样在整个搜索过程中,微粒有可能经常从一个群体跑到另一个群体,搜索方式可能经常变化,运行方向也有可能经常改变.这就是 MPPSO 的基本原理.它与基本 PSO 的不同之处有:① MPPSO 将微粒分成多群,增加了搜索的多样性和搜索的广泛性.②引入不同的相,每相微粒运动的方式、方向都不同.③从整体来看,搜索只朝适应值得到改善的方向进行.

4.2 参数分析

在 MPPSO 中,除了包含基本 PSO 的各参数,其它算法参数主要有:相数 n_{ph} 、相变换频率 f_{ph} 、组系数 C_v, C_x, C_g 和速度重置量 V_c .

(1) 相数 n_{ph}

对离散二进制情况来说,由于 C_x 和 C_g 在每相的可能值只能是 -1 或 1, n_{ph} 最大只能为 4. 对于连续空间,尽管 C_x 和 C_g 可以随机取值, n_{ph} 也不可取得太大,通常也不超过 4^[18].

(2) 相变换频率 f_{ph}

f_{ph} 决定每相之间交换微粒的快慢,通常由两种方法确定:经验比例法和自适应调整法.

在经验比例法中, $f_{ph} = N/\alpha$. N 是最大允许迭代次数, α 是 $[1, N]$ 之间的一个经验数.假如 $f_{ph} = 4$,则每迭代 4 次后,相之间就交换微粒.

在自适应调整法中,若在某一相中,微粒群经若干次迭代后适应值没有改善,就跳到另一相中去.此时, f_{ph} 就为适应值连续没有改善的次数.

(3) 组系数 C_v, C_x, C_g

这三个系数实际上是标识符,它们的值在每相中各不相同. C_v 和微粒的运动速度有关,必须为正, C_x 和微粒的当前位置有关, C_g 和全局历史最好位置有关,且和 C_x 的标识值相反^[18]. MPPSO 允许微粒朝不同的方向移动,若 C_g 为正,则 C_x 必为负.

(4) 速度重置量 V_c

在随机 PSO 和多次启动 PSO 中,为了尽可能不陷入局部极值,往往在效果不好时采用重新启动的策略. MPPSO 也沿用这一思想,经过一定的迭代次数 V_c 后就重新设置速度.例如,若 $V_c = 50$,则每迭代 50 次后就重新初始化微粒速度.同 f_{ph} , V_c 也可以由自适应调整法确定.

4.3 算法方程

在 MPPSO 中,对某一相的每一代微粒,其第 d 维($1 \leq d \leq D$)的速度和位置根据如下方程变化^[18]:

$$v_{id} = C_v \cdot v_{id} + C_g \cdot p_{gd} + C_x \cdot x_{id} \quad (8)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (9)$$

式中, v_{id} 是当前速度, p_{gd} 是全局历史最好位置, x_{id} 是当前位置。

5 PSO 的应用 (Applications of PSO)

目前,PSO 应用领域主要有:函数优化、神经网络训练及其它进化算法常用的应用领域。

5.1 函数优化及与遗传算法的比较

PSO 最直接的应用是函数优化问题,包括多元函数优化、带约束优化问题^[21]。Angeline 经过大量的实验研究发现^[9,10],微粒群优化算法在解决一些典型函数优化问题时,能够取得比遗传算法更好的优化效果。这就说明微粒群优化算法在解决很多实际问题时具有很好的应用前景,因为许多实际问题都可以归结为函数优化问题。此外,PSO 还在各种复杂的优化问题、动态优化问题和多目标优化问题中得到成功应用。例如,文献[15]将离散 PSO 用于求解 TSP 问题,文献[22]研究了 PSO 在噪声和动态环境下的优化问题,文献[23]将 PSO 用于多目标优化问题,都取得了较好的效果。

PSO 与遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 有许多相似之处:都是从多个初始点开始的并行随机搜索,搜索时对目标函数、传递函数都没有求导要求,应用范围都很广,应用方式都很灵活。但两者也有明显的区别:搜索时,PSO 是依据自己的搜索经验和同伴的搜索经验,采用全局搜索和局部搜索相结合的搜索模式得到微粒下一个位置;而 GA 是采用优势个体的选择、交叉、变异的方式产生下一代。在计算时,GA 有编码、解码、选择、交叉和变异等操作;而 PSO 是通过速度对位置的修改来完成的,微粒的位置也不象 GA 那样由于受到编码的限制而不够灵活。迭代时,如果 GA 采用轮盘赌法进行选择,受适应值的绝对大小影响很大,而 PSO 只需比较适应值的大小,与适应值的绝对大小无关。因而,PSO 较 GA 要简单,计算量要小,收敛速度也要快,搜索更具随机性,更不容易陷入局部极值,实用性好,编程实现更容易。

5.2 神经网络训练及与 BP 算法的比较

PSO 是一种非常有潜力的神经网络 (NN) 训练算法,它操作简单,可以方便地调节神经网络的连接权值和阈值,已被成功地用来解决许多实际问题。

如:基于 PSO 的神经网络应用于医疗诊断^[24],分析人的颤抖;文献[25]利用 PSO 训练积单元神经网络,来预测噪声环境的混沌时间序列;文献[26]将基于 PSO 的神经网络应用于香港市区环境污染状况的分析,都得到了很好的效果。

BP 算法在训练神经网络时是利用单一初始值以梯度下降模式进行;而 PSO 在训练神经网络时是以一群微粒,即很多个初始值采用依据自己的经验结合群体的经验,有导向的随机搜索模式进行,因此,PSO 陷入局部极值的概率大大降低。此外,BP 算法在训练神经网络时,需要较复杂的求导计算,导致它对目标函数、传递函数都有要求(要求可求导),隐含层层数也不宜过多。而 PSO 算法在训练神经网络时,无需求导计算,因而对神经网络的层数、目标函数和神经元的传递函数等都没有限制,应用更为灵活方便,应用范围大大拓宽。

5.3 其它应用实例

PSO 被成功地应用于电力系统领域,如:文献[19]将智能 PSO 应用于电磁场的优化分析,文献[27]将 PSO 用于多机电力系统稳定器的优化设计,文献[11]将交叉 PSO 用于电力分布系统电压、电流及负载的状态分布预测和状态值估计,文献[28]使用 PSO 对一个电气设备的反馈功率和电压进行控制,文献[29]将 PSO 用于电力系统负荷模型的参数辨识,这些应用都取得好的效果。

在电机和机械设计方面,文献[30]将 PSO 用于机械结构设计中尺寸和形状的优化设计,得到比遗传算法和梯度下降算法更好的效果;文献[31]采用 PSO 对粗轧宽展控制模型进行优化,结果表明优化后的模型效果明显优于原来的模型,体现了 PSO 在优化领域的优越性;文献[32]将 PSO 应用于发电机参数辨识,提出了一种同步发电机参数辨识的计算框架,结果表明,这种参数辨识算法简单实用,具有可行性;文献[33]结合直线感应电机的设计特点,利用改进的 PSO 对电机进行优化设计,取得了满意的效果。

在半导体器件设计方面,文献[34]将 PSO 用于门级组合逻辑电路的设计,得到比遗传算法更好的效果;文献[35]将改进的 PSO 用于 IIR 数字滤波器的设计,仿真结果表明,与设计 IIR 数字滤波器的遗传算法相比,PSO 具有更好的优化性能。

此外,还有 PSO 用于实际系统的模拟^[36]、通讯^[37]、生物工程^[38]、化学工程^[39]等领域,也都取得很好的效果。

6 结论与 PSO 研究展望 (Conclusion and research expectations of PSO)

PSO 是一种新兴的基于群体智慧的进化算法,人们对其的研究刚刚开始,远没有象遗传算法那样具有坚实的应用基础、系统的分析方法和良好的理论基础,许多问题还有待于进一步研究:

① 应用领域的拓展. 虽然 PSO 已被成功地用于函数优化及神经网络的训练等领域,但在更多领域的应用还处于研究阶段,可见报道不多. 开拓 PSO 新的应用领域,在应用的广度和深度上进行拓展都是很有价值的工作.

② 算法参数的确定. PSO 中的一些参数如 c_1 、 c_2 、 ω 、微粒个数以及迭代次数等往往依赖于具体问题,依据应用经验,经多次测试来确定,并不具有通用性. 因此,如何方便有效地选择算法参数,也是迫切需要研究的问题.

③ 算法的改进研究. 由于实际问题的多样性和复杂性,尽管已出现了许多改进的 PSO,但远不能满足需要. 研究新的改进的 PSO 以便能更好地用于实际问题的求解也是很有意义的工作. 就目前来看,将 PSO 与其它技术相结合,根据不同的优化问题提出相应的改进算法是 PSO 当前的研究热点.

④ 算法的基础理论研究. 与 PSO 相应的相对鲜明的社会特性基础相比,其数学基础显得相对薄弱,缺乏深刻且具有普遍意义的理论分析,不能对 PSO 的工作机理做出合理的数学解释. 虽然 PSO 的有效性、收敛性等性能在一些实例和函数的仿真研究中得到验证,但没能在理论上进行严谨推敲和严格证明. 因此,对 PSO 的基础理论研究非常重要.

参 考 文 献 (References)

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. Proceeding of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1995. 1942 ~ 1948.
- [2] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1995. 39 ~ 43.
- [3] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization [J]. Natural Computing, 2002, 1(2 ~ 3): 235 ~ 306.
- [4] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [A]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1998. 69 ~ 73.
- [5] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [A]. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 81 ~ 86.
- [6] Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 101 ~ 106.
- [7] Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999. 1927 ~ 1930.
- [8] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000. 84 ~ 88.
- [9] Angeline P J. Using selection to improve particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1998 International Conference on Evolutionary Computation [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1998. 84 ~ 89.
- [10] Angeline P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance difference [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming [C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998. 601 ~ 610.
- [11] Naka S, et al. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2003, 18(1): 60 ~ 68.
- [12] Suganthan P N. Particle swarm optimizer with neighborhood operator [A]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999. 1958 ~ 1962.
- [13] Kennedy J. Stereotyping: improving particle swarm performance with cluster analysis [A]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000. 1507 ~ 1512.
- [14] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [A]. Proceedings of the 1997 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1997. 4104 ~ 4109.
- [15] Clerc M. Discrete particle optimization illustrated by the traveling salesman problem [EB/OL]. <http://www.mauriceclerc.net>, 2000.
- [16] Vrahatis M N, Androulakis G S, Manoussakis M E. A new unconstrained optimization method for imprecise function and gradient values [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1996(197): 586 ~ 607.
- [17] Parsopoulos K E, et al. Objective function "stretching" to alleviate convergence to local minima [J]. Nonlinear Analysis, Theory, Method and Applications, 2001, 47(5): 3419 ~ 3424.
- [18] Buthainah A. Multi-phase Particle Swarm Optimization [D]. Italia: Syracuse University, 2002.

- [19] Bergh F V D. An Analysis of Particle Swarm Optimizers [D]. Pretoria; University of Pretoria, 2001.
- [20] Ciuprina G, Ioan D, Munteanu I. Use of intelligent particle swarm optimization in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1037 ~ 1040.
- [21] Ray T, Liew K M. A swarm with an effective information sharing mechanism for unconstrained and constrained single objective optimization problems [A]. Proceeding of the 2001 International Conference on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2001. 75 ~ 80.
- [22] Carlisle A, Dozier G. Adapting particle swarm optimization to dynamic environments [A]. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence [C]. Athens, GA, USA; CS-REA Press, 2000. 429 ~ 434.
- [23] Venter G, Sobieszcanski-Sobieski J. Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization [J]. Structure Multidiscipline Optimization, 2004, 26(1-2): 121 ~ 131.
- [24] Eberhart R, Hu X H. Human tremor analysis using particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1999. 1927 ~ 1930.
- [25] 李爱国, 覃 征. 积单元神经网络预测噪声环境的混沌时间序列 [J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(3): 295 ~ 297.
- [26] Lu W Z, Fan H Y, Lo S M. Application of evolutionary neural network method in predicting pollutant levels in downtown area of Hong Kong [J]. Neurocomputing, 2003, 51: 387 ~ 400.
- [27] Yoshida H, *et al.* A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment [J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1999, 119-B(12): 1462 ~ 1469.
- [28] Abido M A. Optimal design of power-system stabilizer using particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 406 ~ 413.
- [29] 程 颖, 鞠 平, 吴 峰. 负荷模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 25 ~ 29.
- [30] Fourie P C, Groenwold A A. The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization [J]. Structure Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(4): 259 ~ 267.
- [31] 符 强, 等. 基于粒子群算法的粗轧宽展控制模型优化仿真 [J]. 冶金自动化, 2003, 27(3): 1 ~ 4.
- [32] 龙云, 王建全. 基于粒子群游算法的同步发电机参数辨识 [J]. 大电机技术, 2003, (1): 8 ~ 11.
- [33] 夏永明, 等. 粒子群优化算法在直线感应电机优化设计中的应用 [J]. 中小型电机, 2002, 29(6): 14 ~ 16.
- [34] Coello C A C, *et al.* Use of particle swarm optimization to design combinational logic circuits [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Evolvable Systems [C]. Germany: Springer-Verlag, 2003. 398 ~ 409.
- [35] 侯志荣, 吕振肃. IIR 数字滤波器设计的粒子群优化算法 [J]. 电路与系统学报, 2003, 8(4): 16 ~ 20.
- [36] Brandstatter B, Baumgartner U. Particle swarm optimization - mass-spring system analogon [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 997 ~ 1000.
- [37] Dennis G, Yahya R S. Particle swarm optimization for reconfigurable phase differentiated array design [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(3): 168 ~ 175.
- [38] Cockshott A R, Hartman B E. Improving the fermentation medium for Echinocandin B production - part II: particle swarm optimization [J]. Process Biochemistry, 2001, 36(7): 661 ~ 669.
- [39] Claudia O, *et al.* The use of particle swarm optimization for dynamical analysis in chemical processes [J]. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(12): 1783 ~ 1793.

作者简介

陈国初(1971-), 男, 博士研究生. 研究领域为化工过程的建模仿真, 智能算法及其应用.

俞金寿(1939-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为工业过程的建模、仿真、优化与控制等.

作者: 陈国初, 俞金寿, CHEN Guo-chu, YU Jin-shou
作者单位: 华东理工大学自动化研究所, 上海, 200237
刊名: 信息与控制 **ISTIC PKU**
英文刊名: INFORMATION AND CONTROL
年, 卷(期): 2005, 34(3)
被引用次数: 48次

参考文献(39条)

1. Buthainah A [Multi-phase Particle Swarm Optimization](#) 2002
2. Parsopoulos K E [Objective function "stretching" to alleviate convergence to local minima](#)[外文期刊] 2001(05)
3. Shi Y; Eberhart R C [Fuzzy adaptive particle swarm optimization](#)[外文会议] 2001
4. Eberhart R C; Shi Y [Particle swarm optimization: developments, applications and resources](#)[外文会议] 2001
5. Shi Y; Eberhart R C [A modified particle swarm optimizer](#)[外文会议] 1998
6. Ciuprina G; Ioan D; Munteanu I [Use of intelligent particle swarm optimization in electromagnetics](#)[外文期刊] 2002(02)
7. Bergh F V D [An Analysis of Particle Swarm Optimizers](#) 2001
8. Claudia O [The use of particle swarm optimization for dynamical analysis in chemical processes](#) 2002
9. Cockshott A R; Hartman B E [Improving the fermentation medium for Echinocandin B production - part II: particle swarm optimization](#)[外文期刊] 2001(07)
10. Dennis G; Yahya R S [Particle swarm optimization for reconfigurable phase differentiated array design](#)[外文期刊] 2003(03)
11. Brandstatter B; Baumgartner U [Particle swarm optimization mass-spring system analogon](#)[外文期刊] 2002(02)
12. 侯志荣; 吕振肃 [IIR数字滤波器设计的粒子群优化算法](#)[期刊论文]-[电路与系统学报](#) 2003(04)
13. Coello C A C [Use of particle swarm optimization to design combinational logic circuits](#)[外文会议] 2003
14. 夏永明 [粒子群优化算法在直线感应电机优化设计中的应用](#)[期刊论文]-[中小型电机](#) 2002(06)
15. 龙云; 王健全 [基于粒子群游算法的同步发电机参数辨识](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2003(01)
16. 符强 [基于粒子群算法的粗轧宽展控制模型优化仿真](#)[期刊论文]-[冶金自动化](#) 2003(03)
17. Angeline P J [Using selection to improve particle swarm optimization](#)[外文会议] 1998
18. Eberhart R C; Shi Y [Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization](#)[外文会议] 2000
19. Clerc M [The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization](#)[外文会议] 1999
20. Parsopoulos K E; Vrahatis M N [Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization](#) 2002
21. Eberhart R C; Kennedy J [A new optimizer using particle swarm theory](#)[外文会议] 1995

22. [Fourie P C;Groenwold A A The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization](#) 2002(04)
23. [程颖;鞠平;吴峰 负荷模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2003(11)
24. [Optimal design of power-system stabilizer using particle swarm optimization](#)[外文期刊] 2002(03)
25. [Yoshida H A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment](#) 1999
26. [LU W Z;Fan H Y;Lo S M Application of evolutionary neural network method in predicting pollutant levels in downtown area of Hong Kong](#)[外文期刊] 2003
27. [李爱国;覃征 积单元神经网络预测噪声环境的混沌时间序列](#)[期刊论文]-[西安科技学院学报](#) 2003(03)
28. [Eberhart R;Hu X H Human tremor analysis using particle swarm optimization](#) 1999
29. [Venter G;Sobieszcanski-Sobieski J Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization](#)[外文期刊] 2004(1-2)
30. [Carlise A;Dozier G Adapting particle swarm optimization to dynamic environments](#)[外文会议] 2000
31. [Ray T;Liew K M A swarm with an effective information sharing mechanism for unconstrained and constrained single objective optimization problems](#)[外文会议] 2001
32. [Vrahatis M N;Androulakis G S;Manoussakis M E A new unconstrained optimization method for imprecise function and gradient values](#)[外文期刊] 1996
33. [Clerio M Discrete particle optimization illustrated by the traveling salesman problem](#) 2000
34. [Kennedy J;Eberhart R C A discrete binary version of the particle swarm algorithm](#) 1997
35. [Kennedy J Stereotyping: improving particle swarm performance with cluster analysis](#)[外文会议] 2000
36. [Suganthan P N Particle swarm optimizer with neighborhood operator](#) 1999
37. [NAKA S A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation](#)[外文期刊] 2003(01)
38. [Angeline P J Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance difference](#) 1998
39. [Kennedy J;Eberhart R C Particle swarm optimization](#)[外文会议] 1995

引证文献(48条)

1. [杨维. 陈国初. 张延迟. 徐余法. 俞金寿 改进的微粒群算法及其在风电场建模中的应用](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2011(1)
2. [曾祥能. 张永顺. 田波. 贺泽维 基于精英群引导下量子粒子群算法的快速零陷形成技术](#)[期刊论文]-[上海航天](#) 2010(6)
3. [袁琦 基于多种群协同进化的物流配送路径优化](#)[期刊论文]-[宁波大学学报\(理工版\)](#) 2010(2)
4. [林功成 基于微粒群算法的起重机主梁优化设计](#)[期刊论文]-[机电技术](#) 2010(2)
5. [安凤栓. 常俊林. 苏丕朝. 李亚朋. 魏晓宾 基于改进粒子群优化算法的PID控制器参数优化](#)[期刊论文]-[工矿自动化](#) 2010(5)
6. [黄力明 微粒群优化和区域生长结合的彩色图像分割算法](#)[期刊论文]-[陕西理工学院学报\(自然科学版\)](#) 2009(4)
7. [黄力明 混沌微粒群优化算法在图像匹配中的应用](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2009(32)
8. [微粒群优化和区域生长结合的图像分割方法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2009(28)

9. 马惠兰. [基于粒子群优化的WDM全光网络的组播路由优化算法](#)[期刊论文]-[福建电脑](#) 2009(11)
10. 周欣然, 滕召胜, 易钊. [基于混合协同粒子群优化的广义T-S模糊模型训练方法](#)[期刊论文]-[系统工程与电子技术](#) 2009(5)
11. 邵雷, 雷虎民, 赵宗宝. [基于双层优化的非线性系统多模型建模方法](#)[期刊论文]-[计算机应用](#) 2009(5)
12. 王磊, 周玉文. [微粒群多目标优化率定暴雨管理模型\(SWMM\)研究](#)[期刊论文]-[中国给水排水](#) 2009(5)
13. 周先国, 李开宇. [双阈值小波域降噪的微粒群优化](#)[期刊论文]-[应用科学学报](#) 2009(2)
14. 林晨, 俞金寿. [一种DEA-PSO混合算法及其在丙烯酸收率软测量中的应用](#)[期刊论文]-[华东理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(2)
15. 刘虹, 张岐山. [基于微粒群算法的GM\(2, 1, \$\lambda\$, \$\rho\$ \)优化模型](#)[期刊论文]-[系统工程理论与实践](#) 2008(10)
16. 黄力明. [基于微粒群优化的模糊C-均值聚类彩色图像分割](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2008(29)
17. 胡乃平, 宋世芳. [一种局部与全局相结合的微粒群优化算法](#)[期刊论文]-[计算机工程](#) 2008(17)
18. 赵晓东, 王刚. [广义Chebyshev滤波器的优化设计及其快速调试技术研究](#)[期刊论文]-[信息安全与通信保密](#) 2008(4)
19. 丁坚勇, 陶文伟, 张文涛. [基于模拟退火 PSO 的电力系统无功优化](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(工学版\)](#) 2008(2)
20. 黄力明. [基于混沌微粒群优化算法的阈值图像分割](#)[期刊论文]-[数值计算与计算机应用](#) 2008(2)
21. 吴延明, 乔平原, 郝晓弘. [基于参数优化模糊控制的矿车牵引系统研究](#)[期刊论文]-[电气自动化](#) 2008(4)
22. 江海燕, 刘弘. [群体智能及其在建筑设计上的应用探索](#)[期刊论文]-[山东教育学院学报](#) 2008(1)
23. 黄力明. [基于微粒群优化的模糊C-均值聚类图像分割](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2008(9)
24. 周欣然, 滕召胜, 易钊. [粒子群优化的广义T-S模糊模型参数学习方法](#)[期刊论文]-[电子科技大学学报](#) 2008(4)
25. 赵晓东, 王刚. [基于粒子群优化算法的微波滤波器设计](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2008(12)
26. 王雅琳, 王宁, 阳春华, 桂卫华, 张传福. [基于微粒群算法的生料浆调配多目标满意优化](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2008(1)
27. 程启明, 郑勇. [基于PSO算法的多变量PID型神经网络在球磨机控制上应用](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2008(1)
28. 黄力明, 许学军. [基于二阶段微粒群优化模糊C-均值算法的模糊聚类分析研究](#)[期刊论文]-[陕西理工学院学报\(自然科学版\)](#) 2007(1)
29. 叶长荣, 阮奇, 李玲. [微粒群算法在干燥器多变量优化设计中的应用](#)[期刊论文]-[化学工业与工程技术](#) 2007(1)
30. 黄力明. [基于混沌粒子群优化算法的二维熵图像分割方法](#)[期刊论文]-[陕西理工学院学报\(自然科学版\)](#) 2007(4)
31. 刘虹, 张岐山. [混沌-微粒群算法及其在机械优化设计中的应用](#)[期刊论文]-[机械设计与研究](#) 2007(5)
32. 刘虹, 张岐山. [基于微粒群算法的GM\(1, 1, \$\lambda\$ \)模型的机械产品寿命预测](#)[期刊论文]-[机械设计](#) 2007(10)
33. 江善和, 江巨浪, 磊磊. [基于粒子群算法的一种非线性PID控制器](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2007(4)
34. 姚坤, 李菲菲, 刘希玉. [一种基于PSO和GA的混合算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2007(6)
35. 李方方, 赵英凯. [基于小生境粒子群的多峰函数全局优化算法的研究](#)[期刊论文]-[机械与电子](#) 2007(1)
36. 滕居特, 顾幸生. [小生境微粒群优化算法](#)[期刊论文]-[华东理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2007(1)
37. 胡中功, 刘俊. [微粒群算法研究进展](#)[期刊论文]-[武汉科技学院学报](#) 2006(11)
38. 宋雪梅, 李兵, 李晓颖. [一种求解连续对象优化问题的改进蚁群算法](#)[期刊论文]-[微电子学与计算机](#) 2006(10)
39. 冯春丽, 唐毅谦, 赵悦. [一种改进的微粒群优化算法](#)[期刊论文]-[南京航空航天大学学报](#) 2006(z1)
40. 张雪雯, 李艳君. [基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配](#)[期刊论文]-[电网技术](#) 2006(18)

41. [吕琴梅](#), [徐余法](#), [陈国初](#), [俞金寿](#) [三群粒子群优化算法及其在丙烯腈收率软测量中的应用](#)[期刊论文]-[信息与控制](#) 2006(4)
42. [滕居特](#), [陈国初](#), [顾幸生](#) [分段式微粒群优化算法](#)[期刊论文]-[华东理工大学学报（自然科学版）](#) 2006(4)
43. [三种基于进化技术的优化算法及其对比](#)[期刊论文]-[信息技术与信息化](#) 2006(3)
44. [蒋志为](#) [基于模糊集的蚁群聚类算法研究](#)[学位论文]硕士 2006
45. [武广智](#) [地图构建中基于视觉的物体识别与定位](#)[学位论文]硕士 2006
46. [金凤](#) [时间序列系统建模方法研究](#)[学位论文]硕士 2006
47. [王庆云](#) [最小二乘支持向量机建模研究和在乙烯裂解炉软测量中的应用](#)[学位论文]硕士 2006
48. [刘卓倩](#) [粒子群优化算法的研究及其在德士古水煤浆气化炉炉温软测量中的应用](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xxykz200503012.aspx