

文章编号: 1001-0920(2012)04-0481-06

混合蛙跳算法研究综述

崔文华^{1,2}, 刘晓冰¹, 王伟¹, 王介生²

(1. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114044)

摘要: 针对混合蛙跳算法(SFLA)是一种结合了基于遗传基因的模因演算算法和基于群体觅食行为的粒子群优化算法的亚启发式协同搜索群智能算法, 系统地介绍了 SFLA 的基本原理和算法流程, 讨论了 SFLA 的研究进展和应用现状, 并指出了 SFLA 的发展趋势和下一步的研究方向。

关键词: 混合蛙跳算法; 模因演算; 粒子群优化; 群智能

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Survey on shuffled frog leaping algorithm

CUI Wen-hua^{1,2}, LIU Xiao-bing¹, WANG Wei¹, WANG Jie-sheng²

(1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning University Science and Technology, Anshan 114044, China. Correspondent: CUI Wen-hua, E-mail: ccuiwwenhua@yahoo.com.cn)

Abstract: Shuffled frog leaping algorithm(SFLA) is a sub-heuristic collaborative searching swarm intelligent algorithm, which is combined with memetic algorithm(MA) based on genetic genes and particle swarm optimization(PSO) based on the feeding behaviors of particle swarm. Therefore, the basic principle and procedure flowchart of SFLA are discussed in details. The research progress and the application conditions of SFLA are introduced. And the development tendencies and the future research directions are proposed.

Key words: shuffled frog leaping algorithm; memetic algorithm; particle swarm optimization; swarm intelligence

1 引言

20世纪90年代出现的群智能优化算法是受自然界中以群居方式生活的动物活动的启发, 利用群体优势, 对问题的数学描述不要求满足可微、凸性等条件, 在没有集中控制, 不能提供全局模型的前提下, 为寻找复杂问题的解决方案提供的一种新的迭代搜索算法. 混合蛙跳算法(SFLA)是Eusuff等人^[1]于2003年提出的一种基于群体的亚启发式协同搜索群智能算法. 该算法是建立在群中个体具有的模因进化和利用模因实现全局信息交换基础上的. 模因演算算法(MA)是1989年由Moscato^[2]所采用的一种通过启发式搜索解决优化问题的群智能算法, “memetic”是指寄存于人或动物大脑中能指导其行为并能传播的信息, 类似于基因中的染色体. 粒子群优化(PSO)算法是由Kennedy等人^[3]于1995年提出的一种基于群智能方法的演化计算技术, 该算法通过模拟鸟群的觅食

行为实现优化问题的求解. 而SFLA则结合了基于遗传基因的MA和基于群体觅食行为的PSO算法的优点, 具有概念简单、参数少、计算速度快、全局寻优能力强、易于实现等特点^[4-5].

自SFLA提出以来, 便受到国内外学者们的广泛关注, 已在水资源网络优化、装配线排序、PID控制器参数优化、流水车间调度、聚类和风电场电力系统动态优化等领域得到成功应用. 本文首先介绍SFLA的基本原理和算法流程; 然后, 对SFLA的研究现状和研究成果进行全面综述; 最后指出了SFLA进一步的研究方向.

2 标准混合蛙跳算法

2.1 算法原理

SFLA是一种结合了确定性方法和随机性方法的进化计算方法. SFLA的基本思想是^[1]: 随机生成

收稿日期: 2011-07-14; 修回日期: 2011-10-04.

基金项目: 辽宁省教育厅创新团队基金项目(2008T091).

作者简介: 崔文华(1968-), 女, 教授, 博士生, 从事生产调度及金融机具开发的研究; 刘晓冰(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事计算机制造与集成信息系统等研究.

N 只蛙组成初始种群 $P = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, S 维解空间中的第 i 只蛙表示为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iS}]$. 生成初始种群之后, 首先将种群内蛙的个体按适应值降序排列, 并记录蛙群中具有最优适应值的蛙为 X_g ; 然后将整个蛙群体分成 m 个模因组, 每个模因组包含 n 只蛙, 满足关系 $N = m \times n$. 其中: 第1只蛙分入第1模因组, 第2只蛙分入第2模因组, 第 m 只蛙分入第 m 模因组, 第 $m+1$ 只蛙重新分入第1模因组, 依次类推. 设 M^k 为第 k 个模因组的蛙的集合, 其分配过程可描述如下:

$$M^k = \{X_{k+m(l-1)} \in P \mid 1 \leq l \leq n\}, 1 \leq k \leq m. \quad (1)$$

每一个模因组中具有最好适应值和最差适应值的蛙分别记为 X_b 和 X_w , 而种群中具有最好适应值的蛙表示为 X_g ; 然后对每个模因组进行局部搜索, 即对模因组中的 X_w 循环进行局部搜索操作. 根据最初蛙跳规则(如图1(a)所示), 其更新方式为

$$D = r \cdot (X_b - X_w), \quad (2)$$

$$X'_w = X_w + D, \|D\| \leq D_{\max}. \quad (3)$$

式中: r 表示0与1之间的随机数, D_{\max} 表示蛙所允许改变位置的最大值. 在经过更新后, 如果得到的蛙 X'_w 优于原来的蛙 X_w , 则取代原来模因组中的蛙; 如果没有改进, 则用 X_g 取代 X_b , 按式(2)和(3)执行局部搜索过程; 如果仍然没有改进, 则随机产生一个新蛙直接取代原来的 X_w . 重复上述局部搜索 L_{\max} 次, 当完成局部搜索后, 将所有模因组内的蛙重新混合并排序和划分模因组, 再进行局部搜索, 如此反复, 直到定义的收敛条件结束为止, 例如达到混合迭代次数 G_{\max} . 全局信息交换和局部深度搜索的平衡策略使得算法能够跳出局部极值点, 向全局最优方向进行^[5].

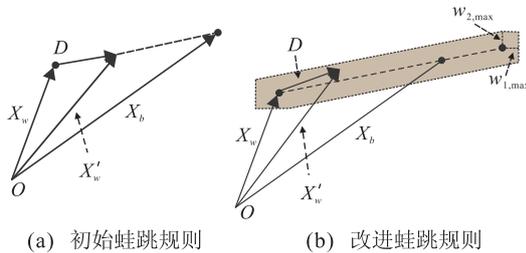


图1 蛙跳规则示意图

标准SFLA中全体粒子(青蛙)的运动过程本质上是一随机过程. 2010年, 骆剑平等^[6]采用Markov链模型对SFLA的收敛性进行了分析, 证明了青蛙族群状态序列是齐次Markov链, 并在此基础上, 通过分析族群状态序列的转移过程, 证明了混合蛙跳算法满足随机搜索算法全局收敛的两个条件, 能够保证全局收敛.

混合蛙跳算法中的种群分割(模因组的生成)是进化过程中的一个关键步骤, 在整个种群优化中具有

重要作用. 标准SFLA采用个体适应度排序进行种群分割. 文献[7]提出了几何分割和随机分割两种模因组的生成方法, 针对几个低维和高维Benchmark函数进行分割性能的评估, 实验结果表明了基于几何分割方法的SFLA具有更好的优化性能.

2.2 改进的蛙跳规则

在蛙群的自然模因进化中, 较差的蛙受较好蛙的影响而为了获得更多的食物跳向较好的蛙. 根据上述初始蛙跳规则(如图1(a)所示), 最差蛙的可能新位置被限定在当前值与最好蛙位置的线段上. 这种规则限制了模因进化的搜索区域, 不仅降低了收敛速度, 而且易导致早熟收敛. Huynh^[8]于2008年提出了一种基于改进的蛙跳规则的SFLA, 并用其对多变量PID控制器参数调节问题进行求解, 结果证明混合SFLA的优化性能优于GA等其他算法. 改进的蛙跳规则如图1(b)所示, 可表示为

$$D = r \cdot c \cdot (X_b - X_w) + W; \quad (4)$$

$$W = [r_1 w_{1,\max}, r_2 w_{2,\max}, \dots, r_S w_{S,\max}]^T; \quad (5)$$

$$X'_w = \begin{cases} X_w + D, \|D\| \leq D_{\max}; \\ X_w + \frac{D}{\sqrt{D^T D}} D_{\max}, \|D\| > D_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 为[0,1]之间的随机数, c 为[1,2]之间的一个常数, r_i ($1 \leq i \leq S$)为[-1,1]之间的随机数, $w_{i,\max}$ ($1 \leq i \leq S$)为第 i 维搜索空间的最大感知和运动的不确定性. 此种蛙跳规则在一定程度上增大了算法搜索范围. 针对早熟收敛问题, 文献[9]对SFLA进行了改进, 将PSO算法中的“个体认知”能力引入SFLA的蛙跳规则(式(2))中, 从而达到改善SFLA的认知行为的目的. 修改后的蛙跳规则为

$$D = r_1 \cdot (X_b - X_w) + r_2 \cdot (P_w - X_w). \quad (7)$$

式中: r_1 和 r_2 均为0与1之间的随机数, P_w 为 X_w 所经过的最好位置. 针对典型的6个连续和离散函数进行的仿真结果表明, 改进后的SFLA在求解效率和收敛速度上都得到了显著改善. 2010年, 郑仕链等人^[10]提出了一种改进的蛙跳规则, 即

$$D' = D + r \cdot (X_b - X_w). \quad (8)$$

式中: D 表示上一次更新时的蛙跳距离向量, D' 表示本次更新时的蛙跳距离向量. 群体初始化时, D 以随机方式产生. 与式(2)相比, 式(8)中包含了对过去经验的记忆, 具备了初步的学习功能, 因此具有更强的寻优能力.

2.3 算法流程

Step 1: ISFLA参数初始化. 初始化蛙种群大小 N , 搜索空间维数 S , 模因组数 m , 则每个模因组包含 n 只蛙 ($N = m \times n$), 蛙所允许改变位置最大值为 D_{\max} , 局部搜索次数为 L_{\max} , 全局混合迭代次数为 G_{\max} , 最

大局部搜索半径为 r_{\max} .

Step 2: 蛙群生成. 随机生成 N 只蛙组成初始种群 $P = \{X_1(t), \dots, X_k(t) \dots, X_N(t)\}, k = 1, 2, \dots, N$, 迭代计数值 $t = 0$; 将每只蛙 $X_k(t)$ 作为连续函数的输入变量, 计算函数值 $F_k(t) = F(X_k(t))$; 对蛙群依据适应度值按递增方式排序, 并以 $U_k(t) = \{X_k(t), F_k(t)\}$ 的形式存储, 记录蛙群最优蛙为 $X_g(t) = U_1(t)$.

Step 3: 模因组生成. 将 U 分成 m 个模因组 $M^1(t), \dots, M^j(t), \dots, M^m(t), j = 1, 2, \dots, m$, 每个模因组包含 n 只蛙, 根据式 (1) 进行分配, 并记录模因组内最优蛙和最差蛙为 $X_b^j(t)$ 和 $X_w^j(t)$.

Step 4: 模因进化. 对模因组 $M^j(t)$ 中的最差蛙 $X_w^j(t)$ 根据图 1(a) 所示蛙跳规则进行局部搜索, 即根据式 (2) 决定蛙跳步长, 根据式 (3) 进行位置更新, 并将其作为连续函数的自变量, 计算其适应度值. 如果更新后的蛙优于原来的蛙, 则取代原来模因组中的蛙; 如果没有改进, 则用 $X_g(t)$ 取代 $X_b^j(t)$, 按照式 (2) 和 (3) 执行局部搜索; 如果仍然没有改进, 则随机产生一个新蛙直接取代原来的 $X_w^j(t)$; 重复上述局部搜索 L_{\max} 次, 得到蛙已经被进化的模因组 $M^1(t)', M^2(t)', \dots, M^m(t)'$.

Step 5: 模因组混合. 将更新后的模因组 $M^1(t)', M^2(t)', \dots, M^m(t)'$ 内的蛙重新混合, 记 $U(t+1) = \{M^1(t)', M^2(t)', \dots, M^m(t)'\}$, 对 $U(t+1)$ 中的蛙依据适应度值按递增方式排序, 更新蛙群最优蛙为 $X_g(t+1) = U_1(t+1)$.

Step 6: 检测算法终止条件. $t = t + 1$, 若 $t < G_{\max}$, 则转 Step 3; 否则, 输出最优蛙.

3 SFLA 的研究进展

3.1 函数优化

函数优化是 SFLA 的经典应用领域, 也是对其进行性能评价的常用算例. 2005 年, Elbeltagi 等人^[4]采用 5 种进化算法 (SFLA, MA, PSO, ACO 和 GA), 针对典型的连续函数优化问题 (Benchmark 函数 F8 和 F10) 进行了执行时间、收敛速度和优化结果性能的比较. 结果显示, SFLA 在 F10 函数的求解方面性能不好, 在 F8 函数求解的成功率和收敛速度优于 GA 算法, 与 PSO 算法相近. 2006 年, Eusuff 等人^[11]采用 5 个标准离散函数测试了 SFLA 的求解效果, 进行了较为系统的测试, 并给出了算法的最佳参数组合. 2007 年, 李英海等人^[12]针对蛙跳算法局部更新策略引起的更新操作前后个体空间位置变化较大、降低收敛速度这一问题, 提出了一种基于阈值选择策略的改进混合蛙跳算法. 2009 年, 赵鹏军等人^[13]针对基本混合蛙跳算法在处理复杂函数优化问题时容易陷入局部最优、收敛速度慢的缺点, 将生物学中的吸引排斥思想

引入 SFLA, 并借鉴类电磁机制算法中计算合力的思想, 修正了其更新策略, 从而维持了子种群的多样性.

混合蛙跳算法与其他智能优化算法的结合是另外一个研究热点. 2008 年, Li 等人^[14]将混沌搜索算子嵌入 SFLA 中, 对梯级电站系统的优化运行进行了仿真. 2009 年, Antariksha^[15]提出了一种基于克隆选择 (CS) 的混合蛙跳算法 CSSFLA, 采用克隆选择算法 (CSA) 种群中最优个体进行寻优, 并采用 SFLA 对种群中最差个体向最优个体方向进行寻优. 该文对 5 个 Benchmark 连续函数进行了仿真, 其结果比 SFLA 具有更快的收敛速率和寻优结果. 文献 [16] 针对连续函数优化问题, 提出一种分组混合粒子群算法 (GSPSO), 每个粒子在进化过程中周期性地基于 PSO 和 SFLA 策略进行分组和混合. 文献 [17] 结合 PSO 算法的学习策略和 SFLA 的混合策略, 提出一种混合粒子群优化算法 (SPSO). SPSO 算法中种群根据适应度值被分成几个模因, 每个模因依据 SFLA 的自学习策略进行进化; 然后所有模因进行混合后依据 PSO 算法的进化策略进行优化, 其学习速率 z 和每个模因 x 的更新公式为

$$z^{k+1} = c_1 r_1^k z^k + c_2 r_2^k (x_{\text{mbest}} - x^k), \quad (9)$$

$$x^{k+1} = x^k + z^{k+1}. \quad (10)$$

式中: x_{mbest} 为模因中的最好适应值; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 表示 0 与 1 之间的随机数. 对 4 个 Benchmark 连续函数, 采用 SPSO 算法与 PSO 和 SFLA 进行优化性能对比实验的结果表明, SPSO 具有更快的收敛速度和全局寻优能力.

3.2 资源网络优化与生产调度

在资源网络优化方面, Eusuff 等人^[1,18]将 SFLA 用于求解水资源网络的管径优化设计问题, 提出了基于 SFLA 和水力仿真计算软件 EPANET 构成的计算机模型 SFLANET, 针对 3 个水资源分布网络优化的仿真结果表明, SFLA 比 GA 和 SA 能在更少迭代次数找到最优解, 并验证了 SFLA 参数的鲁棒性. 2006 年, Elbehairy 等人^[19]采用 SFLA 和 GA 对桥面修复决策问题进行了求解. 2007 年, Elbeltagi 等人^[20]提出了基于搜索加速参数的改进 SFLA, 并用其求解项目管理优化问题. 2007 年, Park 等人^[21]等人提出一种基于 SFLA 的随机优化方法 (SOM), 用于协调驱动交通信号系统, 案例研究结果表明, 整个网络通行时间相对日平均时间提高 3.5%, 对于下午高峰时间则提高了 2.1%.

2011 年, 骆剑平等人^[22]结合文献 [23] 提出的 τ -EO 方法, 提出一种基于实数编码模式的 SFLA, 用于求解容量约束车辆路径问题 (CVRP), 并通过求解标准车辆路径测试集实例验证了所提出的改进算法在保留 SFLA 全局搜索能力强的特点的同时具有极好的跳出局部最优、避免停滞收敛的特性.

生产调度方法和优化技术的研究与应用, 是实现先进制造和提高生产效益的基础和关键. 2007年, Rahimi-Vahed 等人提出了基于 SFLA 和变领域搜索算子的混合多目标蛙跳算法 HMOSFLA, 用于求解多目标混合型装配线排序问题^[5]和置换流水车间调度问题^[24], 解向量按整数串形式编码, 并与 PS-NCGA, NSGA-II 和 SPEA-II 等 3 种多目标遗传进化算法 MOGA 进行了比较, 比较结果表明, HMOSFLA 能得到更多的 Pareto 解, 错误率比其他 MOGA 更小, 而且 Pareto 解集的多样性更好. 2009年, Alinia 等人^[25]结合 SFLA 与基于优先保留交叉 (PPX), 广义顺序交叉 (GOX) 和集合划分交叉 (SPX) 的局域搜索算法成功地求解了作业调度问题 (JSP).

朱光宇等人^[26-27]利用 SFLA 的局部深度搜索及全局广度搜索对元器件贴装顺序组合优化问题进行了求解. 该文利用元器件的编号表达贴装顺序, 设计了符合自然数编码规律的加 (+)、减 (-) 和随机数乘 (\times) 算子代替式 (2) 和 (3) 中的数值运算算子, 针对标准 SFLA 的模因组内蛙更新效率较低、易陷入局部最优解的问题, 提出了依据模因组中每只蛙的目标函数值, 按照三角概率分布策略选择多只蛙加以改进的 MTPDSFLA, 并分析了算法参数对优化性能的影响.

2010年, 蔡良伟等人^[28]针对完工时间最短化的作业车间调度问题, 采用基于工件操作的蛙体结构, 基于蛙体相似性构造了一个改进的混合蛙跳算法, 以有效克服工件机器顺序的约束限制, 保证青蛙新位置的可行性.

针对零空闲流水线调度问题, 王亚敏等人^[29]结合简化邻域搜索算法和部分随机初始化种群策略, 以 E/T 指标最优为优化测度, 采用一种新的种群初始化和排序分组方法, 提出了一种适合于解决零空闲流水线调度问题的蛙跳算法, 在若干 Benchmark 问题上的仿真实验表明了所提出的算法有助于改善解的质量和收敛速度. 文献 [30-31] 则研究了以提前/拖后惩罚指标为目标的批量流水线调度问题 (LFSP), 给出了该问题的数学模型以及小批量的调整策略, 提出了一种采用基于工序的编码方式和基于两点交叉操作设计的新位置生成公式的离散蛙跳算法, 并结合扰动策略、模拟退火概率接受准则和插入邻域搜索对该算法进行了改进.

3.3 组合优化

组合优化问题的目标是从组合问题的可行解集中求出最优解. 从收敛效果和速度上与遗传算法相比, SFLA 也是一种解决组合优化问题的有效工具^[12], 已经在求解旅行商问题、背包问题、时间表问题等方面得到成功的应用.

著名的旅行商问题 (TSP) 是一类典型的组合优化问题. 2009年, 罗雪晖等人^[32]提出一种改进的混合蛙跳算法来求解 TSP 问题, 该算法采用符号编码方式, 因此需首先研究符合离散优化问题的蛙跳规则. 对于种群, 具有全局最好适应度的解表示为 U_g ; 对于每一个子族群, 具有最好适应度的解表示为 U_b , 最差适应度的解表示为 U_w , 其蛙跳规则为^[28]

$$S = \begin{cases} \min\{\text{int}[\text{rand}(U_b - U_w)], s_{\max}\}, \\ U_b - U_w \geq 0; \\ \max\{\text{int}[\text{rand}(U_b - U_w)], -s_{\max}\}, \\ U_b - U_w < 0; \end{cases} \quad (11)$$

$$U_q = U_w + S. \quad (12)$$

式中: S 表示青蛙个体的调整矢量, s_{\max} 表示青蛙个体允许改变的最大步长. 引入调整思想设计了局部搜索策略, 同时在全局信息交换过程中加入了变异操作. 实验结果表明, 改进 SFLA 与 GA 和 PSO 算法相比较, 具有更好的搜索性能.

2010年, 骆剑平等人^[23]针对 TSP 问题的求解, 将改进的具有极强局部搜索能力的幂律极值动力学优化 (τ -EO) 融合于 SFLA. 改进后的 τ -EO 采用组元适应度计算方法, 通过定义边置换增益能量, 结合模拟退火控制过程, 并采取幂律定律, 用概率的方式选取 2-opt 置换产生邻域解. 为避免每个族群最优解的趋同性, 提出了最优样本差异控制策略, 并通过求解 TSPLIB 数据库中的实例验证了改进算法的有效性.

另外一种组合优化问题——时间表问题, 是由不同的约束条件将事件安排到一定的时间段中, 并寻找最佳安排方案. 王亚敏等人^[33]针对考试时间表 (ETP) 问题, 提出一种基于离散蛙跳算法 (DSFLA) 的求解方法, 采用基于时间序列的编码方式和新的个体产生方法扩展了传统蛙跳算法的求解模型, 并通过仿真实验表明了所提出算法及策略的有效性.

3.4 其他优化问题

2008年, Yang 等人^[34]采用 SFLA 与 GA 的混合优化算法求解了基于聚类的基因选择问题, 取得了较好的结果; Nguyen 等人^[35]采用 SFLA 优化模糊逻辑控制器的隶属度函数参数和量化因子, 使球杆系统稳定到其平衡位置, 并通过仿真结果表明了所得模糊控制器的控制性能优于 LQR 控制器.

2009年, 杜长海等人^[36]针对传统交通时段划分方法的局限性, 提出了一种 SFLA 与模糊 C 均值算法 (FCM) 有机结合的交通时段划分方法 SFLA-FCM, 用以解决 FCM 对初值敏感及容易陷入局部极小的缺陷; Amili 等人^[37]采用 SFLA 对 K 均值聚类问题进行求解, 并与 ACO, GA, SA 和 TS 等 4 种随机搜索算法一起对

9组典型数据集进行求解,实验结果显示,SFLA的目标函数值(距离矩阵中所有数值和的最小值)明显优于其他算法的目标值,而且对解的初始状态不敏感。

2009年,陈功贵等人^[38]将混合蛙跳算法(SFLA)应用于含风电场电力系统的动态优化潮流计算,并与PSO算法进行了仿真对比,在IEEE 30节点系统中的计算结果表明,其全局寻优能力和收敛稳定性更好;岳克强等人^[39]为进一步提高离散混合蛙跳算法(DSFLA)的性能,将免疫算法和克隆选择理论分别与DSFLA相结合,提出了免疫蛙跳算法(IDSFLA)和克隆蛙跳算法(KDSFLA),利用这两种智能算法得到了两种新的多用户检测器。另外,SFLA在彩色图像分割^[40]、图像水印提取^[41]、网络文档分类^[42]中也得到成功应用。

4 发展趋势与展望

混合蛙跳算法结合了基于遗传基因的模因演算算法和基于群体觅食行为的粒子群优化算法的优点,是一种基于群体的亚启发式协同搜索群智能算法。SFLA在各种优化问题的求解与应用中展现了其特点和魅力,同时也暴露出它在理论和应用上的诸多不足和缺陷,比如其数学基础显得薄弱,尤其缺乏深刻且具普遍意义的理论分析。虽然SFLA的研究应用已获得了一些成果,但SFLA的研究仍处于起步阶段,理论和应用研究还有许多亟待完善之处。今后的研究重点应集中在以下几方面:

1) 加深SFLA的基础理论研究,包括算法的收敛性、收敛速度估计,算法的并行化研究,早熟机理的探索与预防,信息交换的几何意义与统计解释以及参数设置对算法的影响等方面。

2) SFLA与其他优化技术的比较和融合。SFLA本身是基于模因演算算法与粒子群算法的协同优化,所以应充分利用遗传算法的大范围群体搜索性能,与一些诸如模拟退火、混沌理论和免疫机制等快速收敛的局部优化方法混合,以产生更为有效的全局混合优化方法。这种策略可从根本上提高SFLA性能,对此需进行大量理论分析和实验验证。

3) 拓宽SFLA的应用领域。虽然SFLA已成功应用于水资源网络优化、流水车间调度和聚类问题,但在更多领域的应用还处于研究阶段。在应用的广度和深度上进行拓展会促进SFLA的发展。

5 结论

本文系统地叙述了SFLA的基本原理和算法流程,详细介绍了国内外的研究进展和应用现状,指出了未来SFLA的研究方向和发展趋势。希望本文能为从事SFLA研究和应用的学者提供有价值的参考和建议。

参考文献(References)

- [1] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm[J]. *J of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 210-225.
- [2] Moscato P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms[R]. Caltech Concurrent Computation Program Report 826, California Institute of Technology, 1989: 16-20.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. *IEEE Int Conf on Neural Networks*. New York: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [4] Elbeltagi E, Hezagy T, Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2005, 19(1): 43-53.
- [5] Rahimi-Vahed A, Mirzaei A H. A hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithm for a mixed-model assembly line sequencing problem[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2007, 53(4): 642-666.
- [6] 骆剑平, 李霞, 陈泯融. 混合蛙跳算法的Markov模型及其收敛性分析[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2875-2880. (Luo J P, Li X, Chen M R. The Markov model of shuffled frog leaping algorithm and its convergence analysis[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2010, 38(12): 2875-2880.)
- [7] Mashhadi Kashtiban A, Alinia Ahandani M. Various strategies for partitioning of memplexes in shuffled frog leaping algorithm[C]. *14th Int CSI Computer Conf*. New York: IEEE Press, 2009: 576-581.
- [8] Huynh T H. A modified shuffled frog leaping algorithm for optimal tuning of multivariable PID controllers[C]. *IEEE Int Conf on Industrial Technology*. New York: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [9] Zhang X C, Hu X M, Cui G Z, et al. An improved shuffled frog leaping algorithm with cognitive behavior[C]. *7th WCICA Conf*. New York: IEEE Press, 2008: 6197-6202.
- [10] 郑仕铨, 楼才义, 杨小牛. 基于改进混合蛙跳算法的认知无线电协作频谱感知[J]. *物理学报*, 2010, 59(5): 3611-3617. (Zheng S L, Lou C Y, Yang X N. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios based on a modified shuffled frog leaping algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(5): 3611-3617.)
- [11] Eusuff M, Lansey K, Pasha F. Shuffled frog-leaping algorithm: A memetic meta-heuristic for discrete optimization[J]. *Engineering Optimization*, 2006, 38(2): 129-154.
- [12] 李英海, 周建中, 杨俊杰, 等. 一种基于阈值选择策略的改进混合蛙跳算法[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(35):

- 19-21.
(Li Y H, Zhou J Z, Yang J J, et al. Modified shuffled frog leaping algorithm based on threshold selection strategy[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(35): 19-21.)
- [13] 赵鹏军, 刘三阳. 求解复杂函数优化问题的混合蛙跳算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(7): 2435-2437.
(Zhao P J, Liu S Y. Shuffled frog leaping algorithm for solving complex functions[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(7): 2435-2437.)
- [14] Li Y H, Zhou J Z, Yang J J, et al. The chaos-based shuffled frog leaping algorithm and its application[C]. *4th Int Conf on Natural Computation*. New York: IEEE Press, 2006: 481-485.
- [15] Antariksha B. A clonal selection based shuffled frog leaping algorithm[C]. *IEEE Int Advance Computing Conf*. New York: IEEE Press, 2009: 125-130.
- [16] Li Y H, Dong X H, Liu J. Grouping-shuffling particle swarm optimization: An improved PSO for continuous optimization[C]. *The Int Conf on Swarm Intelligence*. Berlin: Springer Verlag, 2010, 6145: 86-93.
- [17] Zhen Z Y, Wang Z S, Gu Z, et al. A novel memetic algorithm for global optimization based on PSO and SFLA [C]. *The 2nd Int Conf on Advances in Computation and Intelligence*. Berlin: Springer Verlag, 2007, 4683: 127-136.
- [18] Gunhui Chung, Lansey K. Application of the shuffled frog leaping algorithm for the optimization of a general large-scale water supply system[J]. *Water Resour Manage*, 2009, 23(4): 797-823.
- [19] Elbehairy H, Elbeltagi E, Hegazy T, et al. Comparison of two evolutionary algorithms for optimization of bridge deck repairs[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, 21(8): 561-572.
- [20] Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D. A modified shuffled frog-leaping optimization algorithm: Applications to project management[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2007, 3(1): 53-60.
- [21] Byungkyu P, Joyoung Lee. Optimization of coordinated-actuated traffic signal system: Stochastic optimization method based on shuffled frog-leaping algorithm[J]. *Transportation Research Record: J of the Transportation Research Board*, 2009, 2128: 76-85.
- [22] 骆剑平, 李霞, 陈泯融. 基于改进混合蛙跳算法的 CVRP 求解[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(2): 429-434.
(Luo J P, Li X, Chen M R. Improved shuffled frog leaping algorithm for solving CVRP[J]. *J of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 429-434.)
- [23] 骆剑平, 李霞. 求解 TSP 的改进混合蛙跳算法[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2010, 27(2): 173-179.
(Luo J P, Li X. Improved shuffled frog leaping algorithm for solving TSP[J]. *J of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2010, 27(2): 173-179.)
- [24] Rahimi-Vahed, Dangchi M, Rafiei H. A novel hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithm for a bi-criteria permutation flow shop scheduling problem[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 41(11/12): 1227-1239.
- [25] Alinia Ahandani M, Pourqorban Shirjoposht N, Banimahd R. Job-shop scheduling using hybrid shuffled frog leaping[C]. *14th Int CSI Computer Conf*. New York: IEEE Press, 2009: 670-675.
- [26] 朱光宇. 模因内三角概率选择混合蛙跳算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(10): 1979-1985.
(Zhu G Y. Meme triangular probability distribution shuffled frog-leaping algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(10): 1979-1985.)
- [27] 朱光宇, 林蔚清. 基于改进混合蛙跳算法的贴片机的贴片顺序优化[J]. *中国工程机械学报*, 2008, 6(4): 428-432.
(Zhu G Y, Lin W Q. Mounting sequential optimization on surface mounting machine using improved hybrid frog-jumping algorithm[J]. *Chinese J of Construction Machinery*, 2008, 6(4): 428-432.)
- [28] 蔡良伟, 李霞. 基于混合蛙跳算法的作业车间调度优化[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2010, 27(4): 391-395.
(Cai L W, Li X. Optimization of job shop scheduling based on shuffled frog leaping algorithm[J]. *J of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2010, 27(4): 391-395.)
- [29] 王亚敏, 冀俊忠, 潘全科. 基于离散蛙跳算法的零空闲流水线调度问题求解[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(1): 124-130.
(Wang Y M, Ji J Z, Pan Q K. An algorithm based on discrete shuffled frog leaping for no-idle permutation flow shop scheduling problem[J]. *J of Beijing University of Technology*, 2010, 36(1): 124-130.)
- [30] 潘玉霞, 潘全科, 桑红燕. 批量流水线调度问题的混合离散蛙跳算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(6): 1265-1271.
(Pan Y X, Pan Q K, Sang H Y. Hybrid discrete shuffled frog-leaping algorithm for lot-streaming flow shop scheduling problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(6): 1265-1271.)
- [31] Pan Q K, Wang L, Gao L, et al. An effective shuffled frog-leaping algorithm for lot-streaming flow shop scheduling problem[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(5/6/7/8): 699-713.