

# 果蝇优化算法研究进展

王 凌<sup>†</sup>, 郑晓龙

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 作为一种新颖的群智能优化方法, 受基于视觉和嗅觉的觅食行为的启发而提出的果蝇优化算法具有易理解 and 实现、控制参数少的特点. 近年来果蝇优化算法的研究受到了广泛关注, 果蝇优化算法及其变种在诸多工程优化领域得到了成功应用. 阐述果蝇优化算法的设计思想与机制, 重点综述果蝇优化算法的研究进展, 包括维持种群多样性、知识驱动策略与协同机制的设计等方面的改进工作. 同时, 介绍果蝇优化算法在离散优化、多目标优化、不确定优化等方面的扩展性研究工作, 并总结果蝇优化算法的代表性应用研究成果, 最后指出在理论、设计、扩展、应用等方面未来进一步的研究方向和内容.

**关键词:** 群智能; 果蝇优化算法; 知识驱动; 协同; 混合算法

**中图分类号:** TP18      **文献标识码:** A

## Advances in fruit fly optimization algorithms

WANG Ling<sup>†</sup>, ZHENG Xiao-long

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As a novel swarm intelligence based optimization algorithm, the fruit fly optimization algorithm (FOA) inspired by the foraging behavior of fruit flies with vision and smell is easy to understand, implement and has few control parameters. During recent years, the research of the FOA has attracted wide attention, and the FOA and its variants have gained successful applications in many engineering optimization fields. After stating the idea and mechanism to design the FOA, the advances in the research of the FOA are surveyed in details, including the improvement work in terms of maintaining the diversity of the population, designing the knowledge driven strategy and the collaborative mechanisms. Moreover, the generalized research work of the FOA in the fields of discrete optimization, multi-objective optimization and uncertain optimization are also introduced. In addition, the typical applications of the FOA are reviewed. Finally, some future research directions and contents in terms of theory, design, extension and applications of the FOA are pointed out.

**Key words:** swarm intelligence; fruit fly optimization algorithm; knowledge driven; collaboration; hybrid algorithm

### 1 引言(Introduction)

果蝇优化算法<sup>[1]</sup> (fruit fly optimization algorithm, FOA)是基于果蝇觅食行为的仿生学原理而提出的一种新兴群体智能优化算法. 通过模拟果蝇利用敏锐的嗅觉和视觉进行捕食的过程, FOA实现对解空间的群体迭代搜索. FOA原理易懂、操作简单、易于实现, 具有较强的局部搜索能力<sup>[2]</sup>.

自2012年<sup>[1]</sup>提出至今, FOA在优化领域受到了越来越多的关注, 已成为智能优化领域的一种热点算法, 并在诸多领域的工程优化问题上得到了研究与应用. 本文旨在总结近几年国内外有关FOA的主要研究成果, 包括代表性的改进研究以及FOA在离散优化、多

目标优化、不确定优化等领域的扩展研究, 同时介绍FOA的典型应用研究, 最后指出若干进一步研究方向和内容.

### 2 标准FOA(Basic FOA)

果蝇优化算法的机理源于对果蝇种群搜寻食物源的过程的模拟, 分别利用基于嗅觉原理和视觉原理的觅食行为, 设计相应的嗅觉搜索环节和视觉搜索环节, 进而通过两个环节的不断迭代实现果蝇种群的进化, 从而获得问题的最优解或满意解.

相比其他群体智能算法, 果蝇优化算法原理易于理解、易于编程实现、控制参数较少、便于嵌入问题针对性的特定搜索环节. 但是, 标准FOA过于强调对

收稿日期: 2017-01-15; 录用日期: 2017-05-08.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: wangling@tsinghua.edu.cn; Tel.: +86 13701310211.

本文责任编辑: 李少远.

国家重点研发计划(2016YFB0901900)和国家杰出青年科学基金(61525304)资助.

Supported by National Key R & D Program of China (2016YFB0901900) and National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (61525304).

个体邻域的搜索,缺少个体间的协作,局部增强型搜索与全局分散性搜索有待均衡。

标准FOA的搜索原理如图1所示,其流程如下:

**步骤 1** 初始化,包括果蝇位置、种群规模 $N$ 、最大迭代步数等;

**步骤 2** 嗅觉搜索阶段

**步骤 2.1** 在果蝇种群中心附近,随机产生若干个果蝇个体;

**步骤 2.2** 评价果蝇个体,计算相应的气味浓度值,得到适应度;

**步骤 3** 视觉搜索阶段

**步骤 3.1** 选择适应度最优的果蝇个体;

**步骤 3.2** 更新果蝇种群中心;

**步骤 4** 判断是否满足终止条件,譬如最大迭代步数、最大评价次数、总CPU时间、最好解停滞步数等。若满足,输出最终解;否则,则转步骤2。

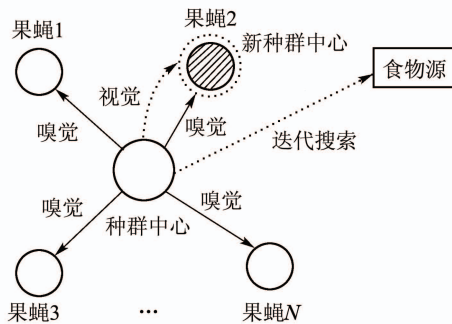


图1 FOA搜索过程示意图

Fig. 1 Illustration of search process of FOA

### 3 FOA的改进研究(Improvements of FOA)

尽管FOA的局部搜索能力较强,但其全局搜索能力相对较弱,搜索过程容易陷入局部极小,进而丧失种群多样性而早熟收敛<sup>[3]</sup>,尤其在求解多峰、高维、大规模等复杂问题时。此外,FOA在嗅觉搜索阶段的寻优为随机搜索操作,缺乏合理的方向性指导,收敛缓慢或效果不佳<sup>[4]</sup>。针对FOA的不足,近年来学术界开展了诸多改进研究,改进思路主要体现在维持种群多样性、知识驱动、协同机制等方面。

#### 3.1 维持种群多样性(Population diversity maintenance)

在整个迭代寻优过程中,FOA的种群向当前最优果蝇个体所在位置移动,一旦确定本次迭代的最优中心位置,所有果蝇个体就将聚集到该中心位置附近。这无疑将削弱种群的多样性。如果该中心位置上的果蝇个体不是全局最优解,则搜索过程极易陷入局部最优,从而导致早熟收敛<sup>[2]</sup>。因此,维持种群多样性是改进FOA的有效途径。目前的代表性工作如下:

1) 多种群机制。FOA中种群多样性的丧失,主要

是由于种群中的所有个体都聚集在种群中心位置。通过引入多种群机制,在迭代过程中确定多个中心位置,能有效避免果蝇群体集中在一个中心位置附近,从而保持种群的多样性,进而提高算法的全局搜索能力。

采用多种群策略,Yuan等<sup>[3]</sup>提出了一种改进的多种群FOA,各个种群之间相互独立,但规模相同且采用相同的进化策略。郑晓龙等<sup>[2]</sup>采用相同的多种群机制,但在种群间引入利用个体之间的差分信息作为搜索的协作机制,进一步提高了种群的多样性。李栋等<sup>[5]</sup>采用双种群策略,两个种群采用不同的搜索策略和搜索半径,分别强调局部搜索和全局搜索,通过不同种群对不同解空间范围的搜索来保持种群的多样性。Wu等<sup>[6]</sup>提出了一种基于云模型的双种群FOA,一个种群开展全局范围的粗搜索,另一个种群负责对当代最优个体进行局部范围的细搜索。韩俊英等<sup>[7]</sup>提出了一种动态双种群FOA,所有果蝇个体根据离当代最优个体和最差个体的远近动态分配到两个种群,靠近最优个体的种群采用混沌搜索机制,而靠近最差个体的种群则采用当代最优个体牵引的搜索机制。同时,两个种群间的信息通过最优个体的更新和种群的个体重组进行交流,进而保持种群的多样性。此外,乐天等<sup>[8]</sup>采用类似的思路设计了双种群协同FOA。

2) 变异机制。变异机制的本质是在算法产生解的过程中加入随机扰动,从而改善算法在每代进化过程中所产生解的多样性,通常可通过引入扰动因子、变异操作或混沌机制来实现。

Wang等<sup>[9]</sup>在FOA的视觉搜索阶段引入变异机制,在当代最优个体的气味浓度值低于历史最优个体的气味浓度值时,对种群中心位置的个体执行变异操作,从而提高种群的多样性,避免算法陷入局部最优。钟伟民等<sup>[10]</sup>在视觉搜索阶段引入差分进化的变异因子,增强了种群的多样性。贺智明等<sup>[11]</sup>利用元胞演化规则选择最优果蝇个体邻域,并对选择后的个体进行随机扰动,扰动因子与当代最优个体气味浓度值相关。韩俊英等<sup>[12]</sup>采用种群适应度的方差作为种群多样性的度量,当种群多样性较低时应用基于Logistic映射的混沌机制来提高种群的多样性。种群多样性除了可用目标空间度量,也可用解空间来度量,而且解空间的度量更加直接准确,但目前尚无相关的研究工作。Mitic等<sup>[13]</sup>在嗅觉搜索阶段引入混沌因子,利用混沌映射的遍历性、随机性等特点来提高所产生解的多样性,其仿真实验指出混沌映射中切比雪夫映射的效果最佳。

3) 突跳机制。利用突跳机制设计智能优化算法是增加种群多样性的一种常见方式<sup>[14]</sup>。通过以一定概率接受新产生的劣解,可避免种群中所有个体都被优势个体牵引,从而改善种群的多样性。

郑晓龙等<sup>[2]</sup>将模拟退火的突跳机制嵌入FOA中,

避免种群个体陷入局部最优解, 成功求解了具有“最优解被多个局部最优解包围”特点的置换流水线调度问题, 并通过基于典型算例的仿真验证了引入突跳机制的有效性。

### 3.2 知识驱动(Knowledge driven)

类似于其他智能优化算法, FOA本质上也是一种随机迭代搜索算法, 其搜索效率无法保障, 其收敛速度和精度在求解不同类型的问题时也差异较大。为了克服以上缺点, 体现算法的智能, 进而改善算法的收敛性能, 近些年学术界提出了若干知识驱动的FOA, 代表性工作如下:

1) 经验知识驱动型。经验知识驱动型FOA主要是研究者根据自身对FOA特性的认知, 结合算法在迭代搜索时应具有的特性分析, 通过改进算法模型而设计的改进算法。

标准FOA采用均匀分布模型来刻画果蝇觅食行为的不确定性。但是, 研究者根据经验判定均匀分布的随机模型无法准确刻画果蝇觅食过程中的不确定性<sup>[15]</sup>, 而正态分布云模型<sup>[16]</sup>能更好地刻画随机性和模糊性等不确定性。因此, Wu等<sup>[6, 15]</sup>提出了基于正态云模型的FOA, 通过设计基于正态云模型的嗅觉搜索机制, 提高算法的收敛性能, 并通过与多种改进FOA的对比验证了基于云模型的FOA的有效性。此外, 韩俊英等<sup>[17]</sup>设计了云模型参数的自适应机制, 进一步改善算法的收敛性能。

搜索步长是决定FOA全局搜索能力和局部搜索能力的关键因素。标准FOA在整个迭代过程中, 采取固定的搜索步长。一般而言, 性能出色的算法在迭代搜索的早期应能在较大的范围内开展全局搜索, 即设置较大的搜索步长; 而在迭代搜索的后期, 由于已落位到有潜力的区域, 需对这些区域开展深度局部搜索, 即设置较小的搜索步长<sup>[18]</sup>。Yuan等<sup>[3]</sup>以及Pan等<sup>[18]</sup>设计了随迭代代数递减的变步长机制, 分别采用与迭代代数相关的幂函数和指数函数。赖豪杰等<sup>[19]</sup>引入模拟退火<sup>[20]</sup>中的退温机制, 设计了基于退温收缩的变步长机制。杨书佺等<sup>[21]</sup>设计了基于果蝇个体分布位置的自适应步长调整机制, 离最优个体较近的果蝇采用较小的搜索步长, 而离最优个体较远的果蝇采用较大的搜索步长, 从而提高了收敛的速度和精度。

2) 问题知识驱动型。通过对问题进行深入分析, 得到相应的知识, 进而用于指引种群个体的搜索, 可以提高算法在迭代过程中的搜索效率。

对于连续优化问题, Wu等<sup>[22]</sup>在理论上分析了果蝇个体在嗅觉搜索时的最佳搜索方向, 设计了能够智能选择进化方向的FOA。对于资源约束不相关并行机调度问题, 郑晓龙等<sup>[23]</sup>分析了问题的最优解和局部最优解的若干特性, 进而利用问题知识设计了能够自适

应选择搜索方向的离散FOA。具体而言, 在特定的资源分配方案下, 没有搜索到局部最优调度时采用局部搜索操作, 反之则采用全局搜索操作。通过自适应的搜索选择机制, 均衡了算法的全局搜索和局部搜索。此外, 郑晓龙等<sup>[24]</sup>通过建立资源约束柔性作业车间调度问题中资源分配方案的概率模型, 提出了一种知识驱动的FOA, 根据后验知识来更新调整概率模型, 同时通过采样资源分配概率模型可获得合理的资源分配方案。

### 3.3 协同机制(Collaboration mechanism)

标准FOA采用单一的搜索机制, 在求解复杂的优化问题时难以获得满意解, 尤其对于具有高维、强约束、大规模、多目标等特性的复杂问题。协同机制通过综合利用多种技术的优势, 实现协同式搜索, 通过多元集成的方式充分发挥各种技术的优势, 进而有效改善算法优化质量、效率和鲁棒性<sup>[25]</sup>。除了前文介绍的多种群协同机制, 目前基于协同机制的代表性FOA主要如下:

1) 策略协同。策略指在算法实现过程中使用的相关方法与技术, 如模型、编码与解码策略、约束处理技术、多目标处理技术等<sup>[26]</sup>。通过多种策略的协作, 实现各策略的优势互补, 是提高算法性能的有效途径。

乐天等<sup>[8]</sup>充分考虑种群中个体的差异, 将种群个体分成高气味浓度子种群和低气味浓度子种群, 两子种群个体分别采用随机和精英个体引导的协同搜索策略。钟伟民等<sup>[10]</sup>提出了一种多策略协同的FOA, 在嗅觉搜索阶段采用粒子群算法<sup>[25]</sup>的社会认知进化策略与差分进化算法<sup>[27]</sup>的差分变异策略相协同的方式, 进而加速算法的收敛, 增加种群的多样性, 并成功应用于汽化炉操作优化问题。针对实际炼钢连铸调度问题, Li等<sup>[28]</sup>设计了一种前向调度和后向调度相协同的解码策略, 在保证满足浇铸约束的同时优化调度目标。

2) 操作协同。单一的搜索操作, 往往使得迭代过程中产生的新解比较类似, 从而使种群中的个体趋向一致, 进而导致搜索过程容易陷入局部最优。采用多操作协同的方式, 能丰富算法的搜索模式, 较好地克服上述缺点。操作协同可分为串行操作协同和并行操作协同。

在串行操作协同方面, 郑晓龙等<sup>[2]</sup>针对置换流水线问题, 设计了插入操作与差分协作操作相协同的机制, 增强了算法产生解的多样性, 可避免陷入局部极小。Han等<sup>[29]</sup>采用邻域搜索操作和局部搜索操作相协同的方式, 提高了算法的局部搜索能力。考虑到资源约束柔性作业车间调度问题包含工件排序、资源分配等多个子问题, Zheng等<sup>[30]</sup>设计了针对工件排序的插入操作与针对资源分配的再分配操作相协同的FOA。

在并行操作协同方面, Han等<sup>[29]</sup>在嗅觉搜索阶段

设计了前向插入、后向插入和交换操作相协同的搜索机制. 通过并行运用多个操作实现协同搜索, 丰富了产生解的多样性. Wang等<sup>[31]</sup>针对多维背包问题的强约束特性, 设计了两种修复操作相协同的约束处理技术, 保证解的可行性. 针对炼钢连铸调度问题, Li等<sup>[32]</sup>设计了基于插入、交换、多插入、多交换4种邻域搜索操作相协同的嗅觉搜索.

3) 算法协同. FOA提供了一个简单易实现的搜索框架, 局部搜索能力强. 因此, 很容易将FOA与其他全局搜索能力强的方法相协同, 进而构造能较好均衡全局搜索能力与局部搜索能力的混合算法. 通过算法协同, 在充分发挥FOA的优势的同时, 发挥另一种算法的优势来增强整体搜索能力.

这方面的代表性成果包括: 细菌觅食算法与果蝇算法的协同<sup>[33]</sup>, 蛙跳算法与果蝇算法的协同<sup>[34]</sup>, 免疫算法与果蝇优化算法的协同<sup>[35]</sup>, 差分进化算法与果蝇优化算法的协同<sup>[36]</sup>, 遗传算法与果蝇优化算法的协同<sup>[37]</sup>.

此外, 也有学者设计了基于多种群的FOA与局部搜索能力较强的算法的协同算法, 譬如多种群FOA与贪婪迭代算法的协同<sup>[32]</sup>, 多种群FOA与局部搜索算法的协同<sup>[33]</sup>.

#### 4 FOA的扩展研究(Extensions of FOA)

标准FOA是针对求解连续函数优化问题提出的, 目前已被扩展应用于求解其他类型的优化问题, 代表性工作如下:

1) 离散优化问题. Wang等<sup>[31]</sup>最先将FOA扩展到求解离散的多维背包问题. 随后, Zheng等<sup>[30]</sup>提出了针对半导体最终测试调度问题的离散果蝇优化算法. 离散FOA保留了标准FOA原有的机制和框架, 通过设计针对离散优化问题的编码、搜索操作, 实现对组合优化问题的求解. 此后, FOA相继被应用于求解不同类型的离散组合优化问题<sup>[28-29, 32]</sup>.

2) 多目标优化问题. 与遗传算法一样, FOA也可以与多目标处理技术相结合, 进而扩展到多目标优化问题的求解. Zhao等<sup>[38]</sup>将非支配排序技术与FOA相结合, 设计了求解混合光伏风力柴油电池系统优化问题的多目标FOA. Balasubbareddy<sup>[39]</sup>将模糊决策技术引入FOA, 提出了一种基于非支配排序的混合多目标算法. Zheng等<sup>[40]</sup>拓展了非支配的概念, 提出了基于增强非支配排序的多目标FOA, 有效求解了多目标环境经济调度问题. 此外, 目标加权也是多目标优化算法设计常用途径.

3) 不确定优化问题. 将不确定性的处理技术与FOA相结合, 是解决不确定优化问题的一种有效途径. 郑晓龙等<sup>[41]</sup>结合序优化理论中的最优计算量分配技术<sup>[42]</sup>, 设计了求解工期为随机数的资源约束项目调度

问题的基于序的FOA.

#### 5 FOA的典型应用(Typical applications of FOA)

迄今, 果蝇优化算法已在多个诸多领域得到广泛应用, 代表性的研究工作如下:

1) 预测. Pan<sup>[1]</sup>利用FOA优化广义回归神经网络的参数, 构造了财物危机分类预测模型, 结果表明FOA优化后的广义回归神经网络的分类预测能力明显增强. 李栋等利用FOA优化极限学习机, 并将算法应用到顾客基金购买行为预测<sup>[43]</sup>以及股票价格预测<sup>[44]</sup>. 聂娜娜等<sup>[45]</sup>利用FOA优化预测模型, 并用于油井计量原油含水率的预测. 刘翠玲等<sup>[46]</sup>利用FOA优化的广义回归神经网络进行尾矿库安全预测. 针对船舶操作预测, 王雪刚等<sup>[47]</sup>利用FOA优化支持向量机的参数. 郭凡等<sup>[48]</sup>采用类似的方法, 进行纺丝性能的预测. Wang等<sup>[49]</sup>利用FOA优化小波神经网络参数, 并应用到预测工业丙烯聚合过程中的熔体指数.

2) 物流. 针对物流管理中的多配送中心选择优化问题, 刘勇等<sup>[35]</sup>设计了一种结合免疫算法和果蝇优化算法的混合算法. 针对库存管理中的联合补充优化问题, Wang等<sup>[50]</sup>设计了一种概率分层的FOA. Mousavi等<sup>[51]</sup>针对供应链管理中的库存选址和分配问题, 提出了一种改进的FOA.

3) 调度. Zheng等<sup>[30]</sup>针对半导体制造中集成电路最终测试调度问题, 设计了一种离散FOA, 获得了比已有算法更好的调度方案. 针对炼钢连铸调度问题, Li等<sup>[32]</sup>设计了一种离散FOA; 针对炼钢连铸中的重调度问题, Li等<sup>[28]</sup>通过加入问题知识驱动的局部搜索对算法进行改进. Han等<sup>[29]</sup>采用FOA与局部搜索相协同的思路, 求解了带阻塞的流水线调度问题. 针对自动化仓库拣选作业调度问题, 刘志雄等<sup>[52]</sup>提出了一种多种群FOA. Zhang等<sup>[53]</sup>针对批量流流水线调度问题, 设计了一种改进的FOA.

4) 控制、辨识与故障诊断. 针对同步发电机参数辨识问题, Yuan等<sup>[3]</sup>提出了一种多群体FOA. 孙立等<sup>[54]</sup>将FOA用于锅炉过热汽温的自抗扰优化控制. 王雪刚等<sup>[55]</sup>利用FOA进行船舶操纵响应模型的辨识. 杨明顺等<sup>[56]</sup>提出了基于FOA的多元质量控制故障模式诊断方法.

5) 电力系统. 赖豪杰等<sup>[19]</sup>将FOA用于水库群的调度优化. Zheng等<sup>[40]</sup>提出了环境经济调度问题的一种增强非支配排序FOA. 针对多资源自动发电量控制问题, Mohanty等<sup>[57]</sup>对FOA的性能进行了对比分析.

6) 结构设计. 王瞳等<sup>[58]</sup>采用FOA进行铸件冒口的优化设计. Kanarachos等<sup>[59]</sup>采用一种基于对比度的FOA优化设计桁架的结构. Rizk-Allah等<sup>[60]</sup>提出了一种FOA框架, 并用于管状直线同步电动机形状的多目

标优化设计.

7) 其他领域. 譬如, 汽化炉的操作优化<sup>[10]</sup>、蛋白质相互作用(protein-protein interaction, PPI)网络的优化<sup>[21]</sup>、月球车的全局路径规划<sup>[61]</sup>、蛋白质复合物的鉴定<sup>[62]</sup>、可靠性冗余优化<sup>[63]</sup>等.

## 6 结语与展望(Conclusions and perspective)

作为一种新兴的群体智能优化算法, 虽然近些年FOA已成为热点研究算法之一, 但其研究还很不成熟, 以下方面尤其值得重视.

1) 算法理论研究. 目前关于FOA的理论研究几乎空白. 尽管FOA在求解优化问题时表现出优越的性能, 但其收敛性、收敛速度、计算复杂性、参数灵敏性等基本理论问题有待深入分析. 此外, 有限时间下的性能分析、最坏性能分析等研究则能为FOA的实际应用提供理论支撑.

2) 知识驱动算法研究. 尽管FOA具有较强的通用性, 但“**No free lunch for optimization**”定理<sup>[64]</sup>表明没有一种算法能够对所有问题都是最有效的. 因此, 需要针对不同的优化问题, 开展问题性质的分析, 一方面获得指导有效性搜索的知识, 另一方面也可获得避免无效搜索的知识, 进而设计知识驱动的FOA, 更合理、更高效地搜索解空间, 从而取得好的性能.

3) 算法扩展研究. 尽管目前FOA已在多目标优化、不确定优化等问题上得到了一些研究, 但很有限. 鉴于问题的多目标性, 考虑到目标间的冲突性以及问题的多解性, 分析现有目标简化、种群分类、随机权、优先关系法等方法的优缺点, 将有效的多目标处理策略与搜索策略相融合, 合理定义相似度、种群分散度、性能分散度等指标, 研究非支配种群的高效排序方法, 根据目标之间的相关性利用主分量分析、熵分析等手段进行降维, 提出基于协同FOA的多目标算法, 保证所得解的多样性、分散性、最优逼近性. 另外, 鉴于问题的不确定性, 譬如随机、模糊、区间等不同特性, 借鉴统计原理、序优化、随机图、约束满足、模糊集等理论与方法, 提出相应的高效FOA.

4) 应用推广研究. 目前FOA已在若干领域的工程优化问题上展现出较好的性能, 但仍有必要拓展其应用领域, 比如控制、管理、交通、电力、能源、制造、经济等. 尤其值得一提的是, FOA在离散组合优化问题上的研究与应用有待加强. 在新领域和新问题上的应用研究有助于促进FOA相关理论与算法研究的发展和完善.

总之, 果蝇优化算法的研究尚不成熟, 许多方面有待发展和完善, 但作为一种新兴的群体智能优化算法, 其前景光明.

## 参考文献(References):

- [1] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012, 26(1): 69 – 74.
- [2] ZHENG Xiaolong, WANG Ling, WANG Shengyao. A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for permutation flow shop scheduling problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(2): 159 – 164.  
(郑晓龙, 王凌, 王圣尧. 求解置换流水线调度问题的混合离散果蝇算法 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(2): 159 – 164.)
- [3] YUAN X, DAI X, ZHAO J, et al. On a novel multi-swarm fruit fly optimization algorithm and its application [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 233(1): 260 – 271.
- [4] WU L, XIAO W, ZHANG L, et al. An improved fruit fly optimization algorithm based on selecting evolutionary direction intelligently [J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2016, 9(1): 80 – 90.
- [5] LI Dong, ZHANG Wenyu. Double subgroups fruit fly optimization algorithm for solving 0-1 knapsack problem [J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(11): 3273 – 3277.  
(李栋, 张文字. 求解0-1背包问题的双子群果蝇优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(11): 3273 – 3277.)
- [6] WU L, ZUO C, ZHANG H, et al. Bimodal fruit fly optimization algorithm based on cloud model learning [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(7): 1877 – 1893.
- [7] HAN Junying, LIU Chengzhong. Fruit fly optimization algorithm with adaptive mutation [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(9): 2641 – 2644.  
(韩俊英, 刘成忠. 自适应变异的果蝇优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2641 – 2644.)
- [8] LE Tian, LU Huijuan, CUI Zhendong, et al. Hierarchical co-evolutionary fruit fly optimization algorithm [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2015, 34(5): 491 – 496.  
(乐天, 陆慧娟, 崔振东, 等. 分层协同进化的果蝇优化算法 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2015, 34(5): 491 – 496.)
- [9] WANG L, SHI Y, LIU S. An improved fruit fly optimization algorithm and its application to joint replenishment problems [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(9): 4310 – 4323.
- [10] ZHONG Weimin, NIU Jinwei, LIANG Yi, et al. Multi-strategy fruit fly optimization algorithm and its application [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 4888 – 4894.  
(钟伟民, 牛进伟, 梁毅, 等. 多策略果蝇优化算法及其应用 [J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4888 – 4894.)
- [11] HE Zhiming, SONG Jianguo, MEI Hongbiao. Fruit fly optimization algorithm based on cellular automata [J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(8): 2295 – 2298.  
(贺智明, 宋建国, 梅宏标. 结合元胞自动机的果蝇优化算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2295 – 2298.)
- [12] HAN Junying, LIU Chengzhong. Adaptive chaos fruit fly optimization algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(5): 1313 – 1333.  
(韩俊英, 刘成忠. 自适应混沌果蝇优化算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1313 – 1333.)
- [13] MITIC M, VUKOVIC N, PETROVIC M, et al. Chaotic fruit fly optimization algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 89(1): 446 – 458.
- [14] WANG L, ZHENG D Z. An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems [J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(6): 585 – 596.

- [15] WU L, ZUO C, ZHANG H. A cloud model based fruit fly optimization algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 89(1): 603 – 617.
- [16] LI D, LIU C, GAN W. A new cognitive model: cloud model [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2009, 24(3): 357 – 375.
- [17] HAN Junying, LIU Chengzhong. Fruit fly optimization algorithm with adaptive parameter [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(7): 50 – 55.  
(韩俊英, 刘成忠. 自适应调整参数的果蝇优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(7): 50 – 55.)
- [18] PAN Q K, SANG H Y, DUAN J H, et al. An improved fruit fly optimization algorithm for continuous function optimization problems [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 62(1): 69 – 83.
- [19] LAI Haojie, LI Xiaoying, ZHANG Lei, et al. Improved FOA for optimal dispatch of cascade reservoirs [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(8): 74 – 76.  
(赖豪杰, 李晓英, 张磊, 等. 基于改进果蝇算法的水库群调度应用研究 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 74 – 76.)
- [20] HWANG C R. Simulated annealing: theory and applications [J]. *Acta Applicandae Mathematicae*, 1988, 12(1): 108 – 111.
- [21] YANG Shuquan, SHU Qin, HE Chuan. A modified fruit fly optimization algorithm and its application in PPI network [J]. *Computer Applications and Software*, 2014, 31(12): 291 – 294.  
(杨书全, 舒勤, 何川. 改进的果蝇算法及其在PPI网络中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(12): 291 – 294.)
- [22] WU L, XIAO W, ZHANG L, et al. An improved fruit fly optimization algorithm based on selecting evolutionary direction intelligently [J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2016, 9(1): 80 – 90.
- [23] ZHENG X L, WANG L. A two-stage adaptive fruit fly optimization algorithm for unrelated parallel machine scheduling problem with additional resource constraints [J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 65(1): 28 – 39.
- [24] ZHENG X L, WANG L. A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(18): 1 – 13.
- [25] KENNEDY J. Particle swarm optimization [M] // *Encyclopedia of Machine Learning*. New York: Springer, 2011: 760 – 766.
- [26] WANG Ling, SHEN Jingnan, WANG Shengyao, et al. Advances in co-evolutionary algorithms [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 193 – 202.  
(王凌, 沈婧楠, 王圣尧, 等. 协同进化算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 193 – 202.)
- [27] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341 – 359.
- [28] LI J Q, PAN Q K, MAO K. A hybrid fruit fly optimization algorithm for the realistic hybrid flowshop rescheduling problem in steelmaking systems [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 932 – 949.
- [29] HAN Y, GONG D, LI J, et al. Solving the blocking flow shop scheduling problem with makespan using a modified fruit fly optimization algorithm [J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(22): 6782 – 6793.
- [30] ZHENG X L, WANG L, WANG S Y. A novel fruit fly optimization algorithm for the semiconductor final testing scheduling problem [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 57(1): 95 – 103.
- [31] WANG L, ZHENG X, WANG S. A novel binary fruit fly optimization algorithm for solving the multidimensional knapsack problem [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 48(1): 17 – 23.
- [32] LI J, PAN Q, MAO K, et al. Solving the steelmaking casting problem using an effective fruit fly optimization algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 72(1): 28 – 36.
- [33] HAN Junying, LIU Chengzhong. Fruit fly optimization algorithm based on bacterial chemotaxis [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(4): 964 – 966.  
(韩俊英, 刘成忠. 基于细菌趋化的果蝇优化算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(4): 964 – 966.)
- [34] LIU Chengzhong, HUANG Gaobao, ZHANG Renzhi, et al. Shuffled fruit fly optimization algorithm with local deep search [J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(4): 1060 – 1064.  
(刘成忠, 黄高宝, 张仁陟, 等. 局部深度搜索的混合果蝇优化算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34(4): 1060 – 1064.)
- [35] LIU Yong, SUN Jingjie, WANG Xuan. Research on multi-distribution center location problem based on immune-fruit fly hybrid optimization algorithm [J]. *World Sci-tech R & D*, 2015, 37(1): 83 – 87.  
(刘勇, 孙静杰, 王萱. 基于免疫果蝇混合优化算法的多配送中心选址问题研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(1): 83 – 87.)
- [36] NIU J, ZHONG W, LIANG Y, et al. Fruit fly optimization algorithm based on differential evolution and its application on gasification process operation optimization [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 88(1): 253 – 263.
- [37] SEGHIR F, KHABABA A. A hybrid approach using genetic and fruit fly optimization algorithms for QoS-aware cloud service composition [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016. Doi: 10.1007/s10845-016-1215-0.
- [38] ZHAO J, YUAN X. Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel-battery system using improved fruit fly optimization algorithm [J]. *Soft Computing*, 2016, 20(7): 2841 – 2853.
- [39] BALASUBBAREDDY M. Multi-objective optimization in the presence of ramp-rate limits using non-dominated sorting hybrid fruit fly algorithm [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, 7(2): 895 – 905.
- [40] ZHENG X L, WANG L, WANG S. An enhanced non-dominated sorting based fruit fly optimization algorithm for solving environmental economic dispatch problem [C] // *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Beijing: IEEE, 2014: 626 – 633.
- [41] ZHENG Xiaolong, WANG Ling. An order-based fruit fly optimization for stochastic resource constrained project scheduling problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(4): 540 – 545.  
(郑晓龙, 王凌. 随机资源约束项目调度问题基于序的果蝇算法 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 540 – 545.)
- [42] CHEN C H, LIN J, YUCESAN E, et al. Simulation budget allocation for further enhancing the efficiency of ordinal optimization [J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2000, 10(3): 251 – 270.
- [43] LI Dong, ZHANG Wenyu. Funds exchange prediction based on extreme learning machine and fruit fly of algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(6): 233 – 237.  
(李栋, 张文宇. 基于FOA-ELM的客户基金购买行为预测仿真 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(6): 233 – 237.)
- [44] LI Dong, ZHANG Wenyu. Stock price prediction based on FAM and ELM [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(6): 233 – 237.  
(李栋, 张文宇. 基于FAM-ELM 股票价格预测研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(8): 209 – 212.)
- [45] NIE Nana, WANG Yingbo, WANG Mingze, et al. Safety prediction of mine tailing reservoir based on FOA-GRNN algorithm [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(8): 39 – 45.  
(聂娜娜, 王英博, 王铭泽, 等. FOA优化GRNN网络的尾矿库安全预测 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(8): 39 – 45.)
- [46] LIU Cuiling, ZHANG Lulu, WANG Jinqi, et al. Application of FOA-GRNN to prediction of moisture content in crude oil of wellhead metering [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(11): 243 – 246, 259.  
(刘翠玲, 张路路, 王进旗, 等. 基于FOA-GRNN油井计量原油含水率的预测 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(11): 243 – 246, 259.)

- [47] WANG Xuegang, ZOU Zaojian. FOA-based SVM parameter optimization and its application in ship manoeuvring prediction [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(6): 884 – 888. (王雪刚, 邹早建. 基于果蝇优化算法的支持向量机参数优化在船舶操纵预报中的应用 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 884 – 888.)
- [48] GUO Fan, DING Yongsheng, HAO Kuangrong, et al. Prediction of spinning performance based on fruit fly algorithm optimized support vector regression [J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(10): 2360 – 2364. (郭凡, 丁永生, 郝矿荣, 等. 基于果蝇算法优化支持向量回归机的纺丝性能预测 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2360 – 2364.)
- [49] WANG W, ZHANG M, LIU X. Improved fruit fly optimization algorithm optimized wavelet neural network for statistical data modeling for industrial polypropylene melt index prediction [J]. *Journal of Chemometrics*, 2015, 29(9): 506 – 513.
- [50] WANG L, LIU R, LIU S. An effective and efficient fruit fly optimization algorithm with level probability policy and its applications [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 97(1): 158 – 174.
- [51] MOUSAVI S M, ALIKAR N, NIAKI S T A, et al. Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified fruit fly optimization algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 87(1): 543 – 560.
- [52] LIU Zhixiong, WANG Yafen, ZHANG Yu. Multiple population fruit fly optimization algorithm for automatic warehouse order picking operation scheduling problem [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(3): 71 – 77. (刘志雄, 王雅芬, 张煜. 多种种群果蝇优化算法求解自动化仓库拣选作业调度问题 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 71 – 77.)
- [53] ZHANG P, WANG L. Improved fruit fly optimization algorithm for solving lot-streaming flow-shop scheduling problem [J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2014, 31(2): 165 – 170.
- [54] SUN Li, DONG Junyi, LI Donghai. Active disturbance rejection control for superheated steam boiler temperatures using the fruit fly optimization algorithm [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 55(10): 1288 – 1292. (孙立, 董君伊, 李东海. 基于果蝇算法的过热汽温自抗扰优化控制 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 55(10): 1288 – 1292.)
- [55] WANG Xuegang, ZOU Zaojian. Identification of ship manoeuvring response model based on fruit fly optimization algorithm [J]. *Journal of Dalian Maritime University (Science and Technology)*, 2012, 38(3): 1 – 4. (王雪刚, 邹早建. 基于果蝇优化算法的船舶操纵响应模型的辨识 [J]. 大连海事大学学报(自然科学版), 2012, 38(3): 1 – 4.)
- [56] YANG Mingshun, LIANG Yanjie, LEI Fengdan, et al. A fault diagnosis for multivariate production process based on fruit fly optimization algorithm [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(2): 138 – 143. (杨明顺, 梁艳杰, 雷丰丹, 等. 基于果蝇优化算法的多元质量控制故障模式诊断 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 138 – 143.)
- [57] MOHANTY B, HOTA P K. Comparative performance analysis of fruit fly optimisation algorithm for multi-area multi-source automatic generation control under deregulated environment [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(14): 1845 – 1855.
- [58] WANG Tong, ZHOU Jianxin, YIN Yajun, et al. Riser optimization based on fruit fly optimization algorithm [J]. *Special Casting & Non-ferrous Alloys*, 2016, 36(3): 246 – 249. (王瞳, 周建新, 殷亚军, 等. 基于果蝇优化算法的冒口优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 246 – 249.)
- [59] KANARACHOS S, GRIFFIN J, FITZPATRICK M E. Efficient truss optimization using the contrast-based fruit fly optimization algorithm [J]. *Computers & Structures*, 2017, 182(1): 137 – 148.
- [60] RIZK-ALLAH R M, EL-SEHIEMY R A, DEB S, et al. A novel fruit fly framework for multi-objective shape design of tubular linear synchronous motor [J]. *Journal of Supercomputing*, 2017, 73(3): 1235 – 1256.
- [61] MAO Zhengyang, FANG Qun. Global path planning for lunar rover based on fruit fly optimization algorithm [J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(23): 45 – 47. (毛正阳, 方群. 基于果蝇优化算法的月球车全局路径规划 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(23): 45 – 47.)
- [62] LEI X J, DING Y L, FUJITA H, et al. Identification of dynamic protein complexes based on fruit fly optimization algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 105(1): 270 – 277.
- [63] MOUSAVI S M, ALIKAR N, TAGHI S, et al. An improved fruit fly optimization algorithm to solve the homogeneous fuzzy series-parallel redundancy allocation problem under discount strategies [J]. *Soft Computing*, 2016, 20(6): 2281 – 2307.
- [64] WOLPERT D H, MACREADY W G. No free lunch theorems for optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 67 – 82.

#### 作者简介:

王凌 (1972–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为优化与调度理论与方法, Email: wangling@tsinghua.edu.cn;

郑晓龙 (1988–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能优化理论与算法, E-mail: zhengxl07@qq.com.