

本文引用格式：李立欣,蔡延光.共生生物搜索算法研究综述[J].自动化与信息工程,2025,46(1):1-13.

LI Lixin, CAI Yanguang. A review of symbiotic organisms search algorithm research[J]. Automation & Information Engineering, 2025,46(1):1-13.

共生生物搜索算法研究综述*

李立欣¹ 蔡延光^{2,3}

- 1.汕头市林百欣科学技术中等专业学校, 广东 汕头 515041
- 2.广州理工学院智能制造与电气工程学院, 广东 广州 510540
- 3.广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 共生生物搜索 (SOS) 算法是一种通过模拟自然界生态系统中生物之间的共生交互作用来求解全局优化问题的新型智能算法, 具有结构简单、寻优能力强、鲁棒性好、无需调整参数等特点, 可有效解决多种优化问题。该文针对一维和多维优化问题分别给出 SOS 算法的结构化表达形式; 并从改进方法和应用角度全面总结其最新研究进展, 进而提出研究展望, 为 SOS 算法的研究和应用提供参考。

关键词: 共生生物搜索算法; 智能算法; 全局优化问题

中图分类号: TP18; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2025)01-0001-13

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2025.01.001

开放获取

A Review of Symbiotic Organisms Search Algorithm Research

LI Lixin¹ CAI Yanguang²

1. Shantou Linbaixin Science and Technology Secondary Vocationl School, Shantou 515041, China
2. School of Intelligent Manufacturing and Electrical Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou 510540, China
3. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The symbiotic organisms search (SOS) algorithm is a novel intelligent algorithm that solves global optimization problems by simulating the symbiotic interactions between organisms in natural ecosystems. It has the characteristics of simple structure, strong optimization ability, good robustness, and no need to adjust parameters, and can effectively solve various optimization problems. This article provides structured expressions of the SOS algorithm for one-dimensional and multi-dimensional optimization problems, and comprehensively summarize its latest research progress from the perspectives of improvement methods and applications, and then propose research prospects, providing reference for the research and application of SOS algorithm.

Keywords: symbiotic organisms search algorithm; intelligent algorithm; global optimization problem

0 引言

随着科学技术的发展和科技成果的广泛应用, 各种优化问题的结构越来越复杂、规模越来越庞大, 传统的求解方法已难以满足需求。而智能算法为求解复杂优化问题提供了一条有效途径。智能算法的提出一般受社会、自然等现象的启发, 如模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法、遗传算法 (genetic algorithm, GA)、蚁群优化 (ant colony optimization, ACO) 算法、灰狼

优化 (grey wolf optimizer, GWO) 算法、差分进化 (differential evolution, DE) 算法、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法等。尽管这些算法能有效解决多种优化问题, 但在一定程度上仍存在易陷入局部最优、收敛速度慢等不足。根据“没有免费午餐”定理^[1], 没有一种算法能完美解决所有优化问题。因此, 对于采用现有算法无法有效解决的优化问题, 一般通过提出一种新算法或改进现有算法来解决。

* 基金项目: 广东省科技计划项目 (2016A050502060, 2020B1010010005); 广州市科技计划项目 (202206010011, 2023B03J1339)。

共生生物搜索 (symbiotic organisms search, SOS) 算法由 CHENG 和 PRAYOGO 于 2014 年提出^[2], 是一种通过模拟自然界生态系统中生物之间的共生交互作用来求解全局优化问题的新型智能算法。SOS 算法具有寻优能力强、鲁棒性好等特点, 被广泛应用于云计算调度、旅行商问题/车辆路径问题、生产调度问题、机器学习、图像处理等领域。

首先, 介绍 SOS 算法的基本思想; 然后, 针对一维和多维优化问题分别给出 SOS 算法的结构化表达形式; 最后, 从改进方法和应用角度总结 SOS 算法的研究进展, 并提出研究展望。

1 SOS 算法

1.1 SOS 算法基本思想

共生关系是指生物体为了生存而形成的共同奋斗、竞争或依赖的关系。常见的共生关系有互利共生、偏利共生和寄生等 3 种关系。其中, 互利共生关系是指两个生物体之间互利共赢的共生关系; 偏利共生关系是指两个生物体之间一方受益, 另一方基本不受影响的共生关系; 寄生关系是指两个生物体之间一方受益, 另一方受害的共生关系。

SOS 算法通过模拟互利共生关系、偏利共生关系和寄生关系求解优化问题。该算法从一个初始生物体种群开始, 每个生物体对应优化问题的一个解; 每个生物体分别进行互利共生、偏利共生和寄生 3 个阶段的共生操作, 以提高生物体的适应 (生存) 能力; 重复执行这 3 个共生操作, 直至算法满足停止准则, 获得的最优个体即为优化问题的最优解。

1.2 共生阶段

1.2.1 互利共生阶段

互利共生关系的典型例子是蜜蜂与花朵之间的关系。蜜蜂从花朵采蜜的同时为花朵授粉, 双方在此过程中同时受益。

设 X_i 为生态系统中的第 i 个个体, 从生态系统中随机选取另一个个体 X_j ($X_j \neq X_i$), 与个体 X_i 进行交互作用。在互利共生阶段, 这两个个体通过互利共生关系提高各自的适应能力。新个体 $X_{i\text{new}}$ 和 $X_{j\text{new}}$ 产生

的方式分别为

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(0, 1) \times (X_{\text{best}} - \mathbf{MV} \times \mathbf{BF}_1) \quad (1)$$

$$X_{j\text{new}} = X_j + \text{rand}(0, 1) \times (X_{\text{best}} - \mathbf{MV} \times \mathbf{BF}_2) \quad (2)$$

式中: $\text{rand}(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; X_{best} 为生态系统中的最优个体, 即适应度值最高的个体, 其对应优化问题的当前最优解; \mathbf{MV} 为两个个体之间的互利关系特征向量, 按照公式(3)计算; \mathbf{BF}_1 和 \mathbf{BF}_2 为受益因子, 体现了生物体在交互作用中的受益程度, 分别按照公式(4)、(5)计算。

$$\mathbf{MV} = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (3)$$

$$\mathbf{BF}_1 = \text{round}(1 + \text{rand}(0, 1)) \quad (4)$$

$$\mathbf{BF}_2 = \text{round}(1 + \text{rand}(0, 1)) \quad (5)$$

$(X_{\text{best}} - \mathbf{MV} \times \mathbf{BF}_k)$ ($k = 1, 2$) 表示 X_i 和 X_j 通过共同努力逐步向最优个体 X_{best} 靠拢, 以增强它们在生态系统中的生存优势。互利共生阶段产生的新个体 $X_{i\text{new}}$ 、 $X_{j\text{new}}$, 若 $X_{i\text{new}}$ 的适应度值比 X_i 高, 用 $X_{i\text{new}}$ 替换 X_i , 否则 X_i 保持不变; 若 $X_{j\text{new}}$ 的适应度值比 X_j 高, 用 $X_{j\text{new}}$ 替换 X_j , 否则 X_j 保持不变。互利共生阶段的操作可用函数 $\text{Mutualism}(X_i)$ 描述。

Function Mutualism(X_i)

```
//函数功能: 对个体  $X_i$  进行互利共生操作
随机选取另一个个体  $X_j$ , 且  $X_j \neq X_i$ 
按照公式(3)计算互利关系特征向量  $\mathbf{MV}$ 
分别按公式(4)、(5)计算受益因子  $\mathbf{BF}_1$ 、 $\mathbf{BF}_2$ 
分别按照公式(1)、(2)计算新个体  $X_{i\text{new}}$ 、 $X_{j\text{new}}$ 
if  $X_{i\text{new}}$  的适应度值比  $X_i$  高
     $X_i = X_{i\text{new}}$ 
end if
if  $X_{j\text{new}}$  的适应度值比  $X_j$  高
     $X_j = X_{j\text{new}}$ 
end if
```

1.2.2 偏利共生阶段

偏利共生关系的典型例子是鲫鱼与鲨鱼之间的关系。鲫鱼附着在鲨鱼身上, 通过吃鲨鱼剩余的食物残渣而受益, 而鲨鱼基本不受影响。

在偏利共生阶段, 个体 X_i 通过偏利共生关系将自

已放置在优于个体 X_j 的位置上，以提高其在生态系统中的适应能力。新个体 X_{inew} 产生方式为

$$X_{inew} = X_i + \text{rand}(-1, 1) \times (X_{best} - X_j) \quad (6)$$

式中： $\text{rand}(-1, 1)$ 为 $[-1, 1]$ 范围内均匀分布的随机数； $(X_{best} - X_j)$ 表示个体 X_j 帮助个体 X_i 逐步向最优个体 X_{best} 靠拢，以增强个体 X_i 在生态系统中的生存优势。

偏利共生阶段产生的新个体 X_{inew} ，若 X_{inew} 的适应度值比 X_i 高，用 X_{inew} 替换 X_i ，否则 X_i 保持不变；个体 X_j 不受任何影响，保持不变。偏利共生阶段的操作可用函数 $\text{Commensalism}(X_i)$ 描述。

Function Commensalism(X_i)

```
//函数功能：对个体  $X_i$  进行偏利共生操作
随机选取另一个个体  $X_j$ ，且  $X_j \neq X_i$ 
按照公式(6)计算新个体  $X_{inew}$ 
if  $X_{inew}$  的适应度值比  $X_i$  高
     $X_i = X_{inew}$ 
end if
```

1.2.3 寄生阶段

寄生关系的典型例子是疟原虫与人类宿主之间的关系。疟原虫通过按蚊在人体内寄生并大量繁殖而获利，而人类宿主可能因此患上疟疾，甚至死亡。

在寄生阶段， X_i 为生态系统中的第 i 个个体，复制个体 X_i 并采用随机策略修改其基因位以产生寄生虫 PV ，从生态系统中随机选取另一个个体 X_j 作为寄生虫的宿主，且 $X_j \neq X_i$ 。这里，个体 X_i 相当于按蚊；寄生虫 PV 相当于疟原虫；个体 X_j 相当于人类宿主。寄生虫 PV 通过个体 X_i ，试图取代个体 X_j 在生态系统中的位置。

寄生阶段产生的寄生虫 PV ，若 PV 的适应度值比 X_j 高，用 PV 替换 X_j ，否则 X_j 保持不变；个体 X_i 不受任何影响，保持不变。寄生阶段的操作可用函数 $\text{Parasitism}(X_i)$ 描述。

Function Parasitism(X_i)

```
//函数功能：对个体  $X_i$  进行寄生操作
产生寄生虫  $PV$ 
随机选取另一个个体  $X_j$ ，且  $X_j \neq X_i$ 
if  $PV$  的适应度值比  $X_j$  高
```

$X_j = PV$

end if

1.3 算法描述

SOS 算法在求解优化问题时与其他智能算法相似，在一组随机产生的初始解的基础上，采用迭代方法重复执行一些操作，从而得到优化问题的最优解。

1.3.1 基本 SOS 算法

基本 SOS 算法可用函数 $\text{SOS}()$ 描述。

Function SOS()

```
//函数功能：求优化问题的最优解
```

Input: 优化问题

Output: 最优解 X_{best}

定义适应度函数

设置算法停止准则

```
/*算法停止准则有迭代次数达到预定值、最优解连续未更新次数达到预定值、最优解对应的目标函数值达到预定要求等*/
```

设置种群规模 $Ecosize$

初始化种群 $X_i (i = 1, 2, \dots, Ecosize)$

```
/*种群初始化方法有随机产生、混沌产生等*/
```

找出生态系统中的最优个体 X_{best}

while 算法停止准则未满足 **do**

for $i = 1$ to $Ecosize$ **do**

 Mutualism(X_i)

 Commensalism(X_i)

 Parasitism(X_i)

 更新最优个体 X_{best}

end for

end while

输出最优解 X_{best}

1.3.2 针对多维优化问题的基本 SOS 算法

对于多维优化问题，可先通过编码将多维变量映射到个体中，再利用 SOS 算法求解。亦可采用函数 $\text{MM_SOS}()$ 来求解，其本质是对每个分量分别进行互利共生、偏利共生和寄生等操作。

Function MM_SOS()

```
//函数功能：求多维优化问题的最优解
```

Input: 多维优化问题及其维数 Dimension

Output: 最优解 X_{best}

```

定义适应度函数
设置算法停止准则
设置种群规模 Ecosize
初始化种群  $X_{k,i}(k=1,2,\dots,Dimension; i=1,2,\dots,Ecosize)$ 
找出生态系统中的最优个体  $X_{best}$ 
while 算法停止准则未满足 do
  for  $i = 1$  to Ecosize do
    for  $k = 1$  to Dimension do
      Mutualism( $X_{k,i}$ )
      Commensalism( $X_{k,i}$ )
      Parasitism( $X_{k,i}$ )
    end for
    更新最优个体  $X_{best}$ 
  end for
end while
输出最优解  $X_{best}$ 

```

1.4 算法特点

SOS 算法可有效解决多类优化问题, 具有以下特点:

- 1) 结构简单, 函数 SOS(), MM_SOS() 结构简单, 易于理解和实现, 便于改进;
- 2) 较强的寻优能力, SOS 算法具有较强的开发能力(局部搜索能力)和搜索能力(全局搜索能力);
- 3) 较好的鲁棒性, SOS 算法在应用过程中不需要调整参数, 只需要设置种群规模、算法停止准则, 可有效避免因参数设置不当而导致的算法开发能力与搜索能力下降的问题。

SOS 算法虽然在很多优化问题上具有较好的性能, 但也存在一些不足, 如算法易陷入早熟、在求解复杂问题时精度不高、后期搜索速度慢等^[3], 其寻优能力还需进一步提高。

2 SOS 算法的改进

在 SOS 算法中, 互利共生与偏利共生阶段均基于当前最优解进行寻优, 增强了算法的开发能力, 但同时削弱了算法的搜索能力, 导致算法易陷入局部最优; 寄生阶段采用随机策略产生寄生虫, 实现种群进化, 但这种随机性意味着进化结果不确定。为了在 SOS 算法的开发能力与搜索能力之间建立良好的平衡, 学者们提出了多种改进策略。根据改进策略的角

度和方法, 本文将其归纳为改进的 SOS 算法、离散 SOS 算法、多目标 SOS 算法等 3 类^[4-6]。

2.1 改进的 SOS 算法

2.1.1 自适应 SOS 算法

自适应机制引入 SOS 算法, 可以提高算法性能。

2.1.1.1 自适应确定受益因子 BF_1 和 BF_2

文献[7]采用自适应机制确定 SOS 算法互利共生阶段的受益因子 BF_1 和 BF_2 , 由当前个体与最优个体的适应度值来决定受益因子的值, 当个体远离最优个体时, 自适应受益因子增强算法的搜索能力; 当个体接近最优个体时, 自适应受益因子增强算法的开发能力, 以保证 SOS 算法在开发能力与搜索能力上的平衡。文献[8]在文献[7]的基础上改进了寄生阶段, 采用生成随机数决定寄生虫的产生方式, 提高了算法的开发能力。文献[9]修改偏利共生阶段的交互作用机制, 结合映射策略(mapping strategy, MS)和惩罚函数(penalty function, PF)分别得到两种增强 SOS (enhanced symbiotic organisms search, ESOS) 算法(ESOS-MS 和 ESOS-PF)。

2.1.1.2 自适应调整种群规模

文献[10]研究了 SOS 算法中种群规模参数对算法性能的影响, 认为随着问题维度的增加, 种群规模也应增加。因此, 根据问题维度自适应调整种群的规模参数, 并且提出了 3 种 SOS 变体算法: lbest_SOS 算法、pbest_SOS 算法、eco_min_max_SOS 算法, 通过对基准函数、工程问题等测试结果表明, eco_min_max_SOS 算法是 SOS 算法的有效替代方案。

2.1.1.3 自适应柯西变异

文献[11]提出一种基于随机游走和自适应柯西变异的 SOS 算法, 用于睡眠分期的特征选择, 以去除冗余和不相关的特征。

2.1.1.4 多策略自适应

文献[12]提出一种多策略自适应 SOS 算法, 根据个体差异在互利共生阶段将种群分为低等生物、一般生物和高等生物 3 个群体, 并对这 3 个群体采用不同的搜索策略, 以实现不同功能。在偏利共生阶段引入一种具有全局最优引导的自适应混合搜索策略, 增强

最优个体 X_{best} 的引导作用，引导算法搜索过程更具目的性和方向性；对超边界个体进行一次变异操作，以增强种群的多样性。

2.1.1.5 自适应精英反向学习

文献[13]提出一种自适应精英反向学习 SOS 算法，在互利共生阶段采用自适应缩放因子自动调整搜索重心，平衡算法的开发能力与搜索能力；在偏利共生阶段采用随机差分扰动项来增强个体在较优解邻域内的搜索能力；在寄生阶段采用精英反向学习变异策略，使种群更新更具方向性和目的性。

2.1.2 混沌 SOS 算法

混沌现象具有不确定、不可重复、不可预测等特点，常用于智能算法的搜索过程，以提高种群的多样性，避免算法陷入局部最优。

2.1.2.1 混沌产生初始种群

文献[14]利用混沌映射序列产生初始种群，增强种群的多样性，在互利共生和偏利共生阶段利用混沌映射取代普通的随机数，提高了解的质量和算法收敛速度。文献[15]利用混沌函数产生初始二进制种群，并提出一种高效二进制混沌 SOS 算法，用于垃圾邮件的检测，提高了垃圾邮件检测的准确性和效率。

2.1.2.2 混沌映射取代普通的随机数

文献[16]在互利共生和偏利共生阶段利用混沌映射取代普通的随机数，采用自适应惩罚机制更新适应度值，并提出一种自适应混沌 SOS 算法，解决了电力系统的无功优化问题。

2.1.2.3 混沌局部搜索

文献[17]提出一种混沌 SOS 算法，在算法每一代进化结束时，引入混沌局部搜索 (chaotic local search, CLS) 策略，以提高搜索性能和收敛性，避免陷入局部最优。文献[18]在文献[17]的基础上舍弃了寄生阶段的操作，进一步提高了算法性能。

2.1.3 基于 SOS 算法的混合算法

针对基本 SOS 算法求解优化问题时存在的缺陷，许多学者将其他优化算法与 SOS 算法相结合，弥补 SOS 算法的不足，提高了算法性能。

2.1.3.1 SOS 算法与 SA 算法混合

文献[19]将 SOS 算法与 SA 算法相结合，提高了算法的收敛速度和搜索能力，在云计算环境下的任务调度、旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP) 等领域均有较好的表现。

2.1.3.2 SOS 算法与 GA 混合

受 GA 的选择、交叉和变异算子启发，文献[24]在求解 TSP 时，将交换、反转和插入这 3 种变异算子引入 SOS 算法中，以增强种群的多样性。

2.1.3.3 SOS 算法与 PSO 算法混合

文献[26]在同时优化特征子集和邻域大小的问题上，提出 5 种基于 DSOS 及其变体算法的优化方法 (其中一种方法是将 DSOS 与 PSO 算法相结合)，测试结果表明，这些方法在同时优化方面取得了较好效果，且误差更小。文献[27]结合改进的粒子群 (improved particle swarm optimization, IPSO) 算法和改进的共生生物搜索 (modified symbiotic organisms search, MSOS) 算法，提出一种 HIPSO-MSOS 算法，其中，SOS 算法仅利用偏利共生阶段，解决了复杂三维场景下的无人机路径规划 (unmanned aerial vehicle, UAV) 问题，无论在精度、收敛速度、稳定性和鲁棒性等方面均优于对比算法。

2.1.3.4 SOS 算法与 ACO 算法混合

文献[28]利用 ACO 算法相对强大的开发能力弥补了 SOS 算法的不足，提出一种 SOS-ACO 算法，解决了约束条件下的最优装配序列问题。

2.1.3.5 SOS 算法与 GWO 算法混合

文献[29]针对 SOS 算法易陷入局部最优及搜索停滞等问题，提出一种基于多角色优化策略的混合 GW-SOS 算法，从算法内部结构、防止停滞机制、混合智能优化 3 个方面对基本 SOS 算法进行改进，减少无效搜索的同时保持种群的多样性。

2.1.3.6 SOS 算法与 DE 算法混合

文献[30]提出一种混合 DE-SOS 算法，舍弃了寄生阶段，改进互利共生和偏利共生阶段的交互作用机制，引入牵引函数以提高算法开发能力，采用扰动策略以增强鲁棒性。类似地，文献[31]提出一种结合 DE 算法和 SOS 算法的混合优化算法，并提出新的混合

算子,有效增强了算法的全局和局部搜索能力,提高了最优解质量和收敛速度。

2.1.3.7 SOS 算法与回溯搜索优化算法^[32]混合

文献[33]基于回溯搜索优化算法 (backtracking search optimization algorithm, BSA) 搜索能力强且保留历史种群信息的特点,提出一种 e-SOSBSA 算法,引入具有自适应变异率的变异算子,以帮助算法跳出局部最优;加入具有自适应交叉率的交叉算子,利用历史种群信息生成更优解,从而提高算法效率。

综上所述,以上混合算法主要用于解决复杂的组合优化问题。组合优化问题往往是 NP 难题,其求解过程耗时随问题规模的扩大呈指数级增长^[34]。因此,将 SOS 算法与其他智能算法混合,是未来 SOS 算法研究的一个重要方向。

2.1.4 集成反向学习的 SOS 算法

反向学习 (opposition-based learning, OBL)^[35]由 TIZHOOSH 于 2005 年提出,并被应用于种群初始化和种群进化,可增强种群的多样性,提高算法的开发能力与搜索能力。将 OBL 引入 SOS 算法中,得到反向共生生物搜索 (oppositional symbiotic organisms search, OSOS) 算法、准反向共生生物搜索 (quasi-oppositional symbiotic organisms search, QOSOS) 算法、准反射共生生物搜索 (quasi-reflected symbiotic organisms search, QRSOS) 算法等改进形式。在上述算法中,大体上都是在 SOS 算法的种群初始化阶段,利用 OBL 增强种群的多样性;在每一代进化结束时,根据跳跃概率决定是否更新种群个体。

2.1.4.1 OSOS 算法

文献[36]提出一种 OSOS 算法,通过引入 OBL 加速算法收敛,解决彩色图像分割问题的效果明显优于 SOS 算法或其他算法。文献[37]将 OSOS 算法与灾变算法 (catastrophe phase algorithm, CA) 相结合提出 OBSOS-CA,在种群初始化和寄生阶段引入 OBL,增强种群的多样性;采用灾变思想跳出局部最优;在下一代迭代的互利共生和偏利共生阶段引入变邻域下降法,以增强算法的开发能力。

2.1.4.2 QOSOS 算法

文献[38]利用 QOSOS 算法解决了电力系统的负荷频率控制问题。文献[39]采用 QOSOS 算法解决了输气压缩机设计优化和产气设施容量优化的问题。文献[40-41]将 QOSOS 算法和 CLS 算法相结合,提出一种 QOCSOS 算法,解决了径向配电网中分布式发电机组的布置与分配问题。文献[42]在结合 QOSOS 算法和 CLS 算法的基础上,引入两种寄生虫产生策略,提高了算法寄生阶段的性能。文献[43]将 QOCSOS 算法和随机森林 (random forest, RF) 算法相结合,提出 QOCSOS-RF 算法,解决了电力系统的最优潮流问题。

2.1.4.3 QRSOS 算法

文献[44]提出 QRSOS 算法,有效解决了短期水电系统发电优化的问题。

2.1.5 其他改进方法

为提高 SOS 算法性能,许多学者研究了 SOS 算法的其他改进方法,如引入局部搜索策略,对 SOS 算法的交互作用机制、种群初始化、个体选择等方面进行改进。

2.1.5.1 引入局部搜索策略

在 SOS 算法中引入局部搜索策略,是提高算法开发能力的一种常见手段。文献[45]将 SOS 算法与局部搜索策略相结合,得到一种混合 SOS 算法,解决了置换流水车间调度的问题,提升了算法的搜索能力。文献[46]提出一种混合变邻域 SOS 算法,解决了容量受限车辆路径问题 (capacitated vehicle routing problem, CVRP),在算法每一代进化结束时,引入变邻域搜索 (variable neighborhood search, VNS) 算法,包括重置、交换、2-Opt 等 3 种局部搜索策略,有助于算法跳出局部最优,有效提高解的质量。文献[47]将 SOS 算法与 VNS 算法相结合,提出一种 SOS-VNS 算法求解 TSP,加入 VNS 算法可生成更好的初始解。文献[37]在提出的 OBSOS-CA 中,VNS 算法采用变邻域下降法,增强了算法的开发能力。

2.1.5.2 增加或删除某些共生交互阶段

文献[48]提出一种改进的 SOS 算法求解无约束优化问题,将互利共生和偏利共生阶段的随机值替换成随机加权参数,提高了算法的搜索能力;该算法还增

加了第4个交互作用——捕食阶段，以模拟生态系统中捕食者和猎物之间的交互关系，捕食者以猎物为食物而导致猎物死亡，与寄生阶段的区别在于，并非所有的寄生虫都会杀死它们的宿主。文献[49]在求解CVRP时，在SOS算法中增加了两个交互作用（竞争阶段和偏害共生阶段），并在文献[50]提出的求解CVRP两种解的表示方法(SR-1和SR-2)的基础上，开发了6个SOS算法的改进版本，包括SOS_{Canonical}、SOS_{Basic}、SOS_{SR-1}、SOS_{SR-2}、ISOS_{SR-1}和ISOS_{SR-2}；实验结果表明，这些版本的算法均提高了解的质量和收敛速度。文献[51]提出一种MSOS算法来解决经济调度问题，在互利共生和偏利共生阶段引入新的交互机制来更新解，舍弃寄生阶段，并加入混沌序列以提高算法的搜索能力。文献[52]改进互利共生和偏利共生阶段的交互机制，进一步提升了SOS算法的性能。文献[53]提出一种MSOS算法，解决了桁架结构优化的问题。其对SOS算法提出5点改进：1) 将互利共生阶段的受益因子固定为1，使每个个体受益均等；2) 利用随机个体取代最优个体，提高搜索能力；3) 将偏利共生阶段的随机数限定在[0.4, 0.9]之间，提高算法的收敛速度；4) 采用精英策略为下一代进化获得最优个体；5) 去掉寄生阶段，减少算法耗时。在后续的研究中，还将SOS算法与深度神经网络(deep neural networks, DNN)相结合^[54]，用于优化功能梯度板的材料分布问题。

2.1.5.3 修改共生交互阶段的交互机制

文献[55]研究了受益因子 BF 对算法性能的影响，并提出一种去除受益因子的修正SOS算法，但其性能不如基本SOS算法。为此，学者们提出采用两种组合方案来改进修正SOS算法。文献[56]提出一种增强SOS算法，在寄生阶段引入新的交互机制，根据随机概率选择执行原始寄生阶段或克隆变异寄生阶段。文献[57]提出一种新的寄生阶段交互机制，并采用新的选择算子防止解趋同，以保持种群多样性。文献[58]改进寄生阶段的交互机制，以平衡SOS算法的开发能力和搜索能力。文献[59]采用异步学习因子修改偏利共生阶段的交互作用公式，得到一种基于异步变化

学习策略的SOS算法，该算法能够根据当前迭代次数自适应地更新个体，平衡该阶段的局部搜索和全局探索能力，加快种群的收敛速度和精度。文献[60]提出一种基于加权扰动的SOS算法，用于求解桩网复合地基优化的数学模型，在偏利共生阶段引入加权扰动策略，在寄生阶段仅对部分个体进行寄生操作，使算法精度更高、收敛速度更快、寻优性能更好。文献[61]提出一种MSOS算法，用于分析不同充电模式下的充电行为对混合动力汽车的影响；该算法在每一代进化结束时引入两个改进步骤：1) 采用Levy飞行模型增强种群个体的搜索能力，避免陷入局部最优；2) 利用种群平均值促进个体向最优解靠拢，提高算法的开发能力和搜索能力。文献[62]提出一种MSOS算法，用于求解林火图像的最佳阈值分割问题，在偏利共生阶段引入精英反策略和Levy飞行模型，扩大了算法的搜索空间，增强了搜索轨迹的随机性。文献[63]在文献[53]的基础上，改进3个交互阶段的运行机制，提出一种MSOS算法，该算法在搜索能力和开发能力之间取得了更好的平衡，可有效求解一维可控源音频大地电磁法模型。文献[64]通过改进寄生虫的产生方式，提高了SOS算法的收敛速度，与其他智能算法相比，该算法更可靠、高效。文献[65]提出一种改进的SOS算法，用于解决无约束和带约束的4类高维优化问题，利用互利共生阶段和寄生阶段的多个作用向量，进行复杂度、统计和收敛分析，从不同角度衡量了算法的有效性。

2.1.5.4 修改种群或个体操作

文献[66]提出一种MSOS算法，用于优化通信系统的性能，该算法将种群细分为3个子物种，分别以相应的概率参与算法运算，在收敛性和准确性等方面均有所改进。文献[67]提出一种基于子种群拉伸操作的精英SOS算法，在互利共生阶段将种群个体分为2个子种群，分别负责开发与搜索任务；在偏利共生阶段引入拉伸因子和差分扰动项，以减少进化的盲目性；在寄生阶段采用精英寄生机制，提高了算法性能。文献[68]提出一种基于旋转学习策略的SOS算法，将串行个体更新方式改为并行种群更新方式，并从原始种

群和新种群中各取一半个体组成新的迭代种群,提高了算法的收敛速度与精度;在寄生阶段引入遍历最优的旋转学习策略,以增强种群的多样性,提高算法跳出局部最优的能力。文献[69]在互利共生阶段选择个体时,采用基于适应度值比例选择的轮盘赌法代替非随机选择方法,使适应度较高的个体被选中的概率更大,引导其向最优解靠拢,提高了 SOS 算法的收敛速度。文献[70]采用轮盘赌法选择个体,在寄生阶段采用适应度动态调整变异率而非固定值进行寄生操作,利用梯度思想引导个体变异方向,使适应度高的个体变异率更低,而适应度低的个体变异率更高,以便更好地增加优质个体的数量,减少劣质个体的数量,从而提高算法的收敛速度和收敛精度。

此外,学者们还将 SOS 算法与支持向量机^[71-74]、聚类方法^[75-76]等结合起来改进算法,使其能够有效求解复杂的优化问题。

2.2 离散 SOS 算法

SOS 算法最初是为了解决连续空间的优化问题而提出的。为了使其适用于解决组合优化问题或离散优化问题,学者们提出了离散共生生物搜索(discrete symbiotic organisms search, DSOS)算法。近年来,离散优化问题已成为优化领域的研究热点,如车辆路径问题、系统调度问题、网络选址问题等。

2.2.1 DSOS 算法求解资源平衡问题

SOS 算法的提出者 CHENG^[2]在该算法提出一年后,提出了一种 DSOS 算法^[77],用于优化多项目调度中的资源平衡问题,以减少资源浪费,提高项目的整体效益。DSOS 算法通过一个函数将可行域中的实数转换为整数,其步骤与 SOS 算法基本相同。文献[78]在 DSOS 算法的基础上,引入基于网络层次的启发式规则,产生寄生阶段的寄生虫算子,增强了该阶段算法的开发能力,避免了过早停滞,较好地解决了大规模建设项目中时间成本权衡的问题。

2.2.2 DSOS 算法求解 TSP

在 SOS 算法与 GA 混合时,实际上已经进行了离散化处理。文献[24]改进了基本 SOS 算法的结构,引入了交换、反转和插入 3 种变异算子,以增强种群

的多样性,在解的质量、收敛速度及执行时间等方面均优于对比算法。文献[25]提出一种基于卓越系数和自逃逸策略的离散共生生物搜索(discrete symbiotic organisms search with excellence coefficients and self-escape strategy, ECSDSOS)算法,用于求解 TSP;其中,卓越系数使 ECSDSOS 算法能够选择较短的边(路线),以产生更优的局部路径,提高开发能力,加速算法寻找满意解的过程;自我逃逸策略提高了生物体的多样性,防止 ECSDSOS 算法陷入局部最优,抑制早熟收敛,提高了搜索能力,与文献[24]提出的 DSOS 算法相比, ECSDSOS 算法能用较少的迭代次数找到更优的解。文献[79]针对 DSOS 算法易陷入局部最优导致收敛精度低的问题,提出一种基于基因转移和消除路径交叉策略的多种群 DSOS 算法,通过采用多种群并行策略,提高算法在全局寻优过程中的多样性,从而提高算法的收敛速度和收敛能力。

2.2.3 DSOS 算法求解任务调度问题

文献[80]提出利用 DSOS 算法解决云计算环境中的任务调度问题,对于大规模的调度问题,其收敛速度相较于 PSO 算法更具优势。文献[81]分析了基于 DSOS 算法的云计算任务调度能耗,并验证了该算法在优化任务调度负载平衡与能耗计算方面的有效性。

2.2.4 DSOS 算法解决机器学习问题

文献[26]提出基于 DSOS 算法及其变体版本算法的 5 种不同优化方法,用于机器学习的特征选择,在优化特征子集和 KNN 模型的邻域大小方面均有较好的表现,提高了分类准确性。

2.3 多目标 SOS 算法

多目标优化问题(multi-objective optimization problem, MOP)是从一个问题所有可能的备选方案中,选择多种指标综合较优的解决方案的一种问题。MOP 一直是科学研究与工程应用领域的热点与难点。现有的大多数优化方法是通过一定的方法将 MOP 转化为单目标优化问题。但一般情况下, MOP 的目标之间是相互联系的,一个目标的优化可能会引起若干个其他目标的劣化,难以做到所有目标同时达到最优值。为此,学者们将 SOS 算法用于解决 MOP,提出多目标

共生生物搜索 (multi-objective symbiotic organisms search, MOSOS) 算法。

2.3.1 MOSOS 算法求解桁架结构优化问题

文献[82]提出分别用 MOSOS 算法、多目标自适应 SOS 算法、基于双存档技术的多目标自适应 SOS 算法来解决桁架结构优化问题, 在平衡探索与开发的同时提高了种群的多样性和求解效率, 与其他多目标优化算法相比, 这些算法更具竞争力。文献[83]继续对 MOSOS 算法进行改进, 提出自适应的互利共生阶段和改进寄生阶段, 有效改善了算法的开发能力与搜索能力。

2.3.2 MOSOS 算法求解项目调度问题

文献[84]提出 MOSOS 算法, 用于解决建设项目的调度问题, 实现工期、成本和劳动力利用率的最优协调。文献[85]将 MOSOS 算法与 OBL 相结合, 得到反向多目标 SOS 算法, 用于解决重复性项目的调度问题。文献[86]重新设计 MOSOS 算法 3 个阶段的交互作用机制, 得到一种新的 MOSOS 算法, 解决了合作伙伴选择的问题, 可应用于团队组建、供应链管理等方面。

2.3.3 非支配排序多目标共生生物搜索算法

文献[87]提出一种非支配排序多目标共生生物搜索 (non-dominated sorting multi-objective symbiotic organisms search, NSMOSOS) 算法, 用于生成脑机接口的最优特征子集, 在分类精度及特征约简等方面均取得较好的效果。文献[88]提出一种混沌 MOSOS 算法, 通过集成 CLS、快速非支配排序策略来获得 Pareto 解, 用于确定分布式发电机在径向配电系统中的最优位置和大小。文献[89]提出一种多目标改进 SOS 算法, 用于求解径向配电系统中分布式发电机组的优化分配问题, 在寄生阶段引入基于混沌的交叉算子, 以增强种群的多样性, 采用分层非支配排序来寻找 Pareto 解。

3 SOS 算法的应用

SOS 算法的应用领域大致可归纳为云计算调度、TSP/CVRP、生产调度问题、机器学习、图像处理、路径规划、电力系统优化与控制、结构优化等, 如表 1

所示。需要说明的是, 部分文献同时解决了多个问题, 因而出现在多个应用领域, 且大部分文献在前文已有叙述, 此处不再赘述。

表 1 SOS 算法的应用领域分类

序号	应用领域	参考文献序号
1	云计算任务调度	[14][19][76][80][81][84][85]
2	TSP/CVRP	[22][24][25][46][47][49]
3	生产调度问题	[23][28][37][45]
4	机器学习	[11][15][26][71][72][73][74][75][87]
5	图像处理	[36][62]
6	路径规划	[27][30]
7	电力系统优化与控制	[16][18][20][21][38][42][43][44][88][89]
8	机组布置与调度	[17][40][41][51][52][69]
9	结构优化	[7][8][9][31][33][53][54][58][82][83]
10	资源均衡	[57][77]
11	项目管理	[78]
12	机械设计	[33][42]
13	算法研究	[12][13][29][39][48][55][56][59][66][67][68]
14	其他领域	[60][61][70][86]

4 结论与展望

本文针对一维和多维优化问题, 给出 SOS 算法的结构化表达形式; 归纳了 SOS 算法的主要改进形式, 包括自适应 SOS 算法、混沌 SOS 算法、基于 SOS 的混合算法、集成反向学习的 SOS 算法及其他改进方法; 综述了离散 SOS 算法和多目标 SOS 算法的研究现状; 分类总结了 SOS 算法的应用情况。

SOS 算法具有结构简单、寻优能力强、鲁棒性好等特点, 使用时不需要参数调整, 能够有效解决多类优化问题, 具有较好的发展前景。未来, SOS 算法研究的主要方向有:

1) SOS 算法的改进, 主要改进方法包括修改共生交互阶段的交互机制、增加或删除某些共生交互阶段、借鉴其他智能算法、引入新的操作、引入新型自适应机制、混沌机制、局部搜索策略、OBL, 探索与其他智能算法、机器学习算法等结合的新方法;

2) 离散 SOS 算法、多目标 SOS 算法离散优化问题与多目标优化问题是研究热点, 重点针对 TSP、

CVRP、生产调度问题等标杆性 NP，研究基于 SOS 算法的求解方法；

3) 针对大规模优化问题，研究其基于 SOS 算法的求解方法；

4) 种群规模及算法停止准则的设置方法，预先估计、事后分析算法的精度、收敛速度、鲁棒性等性能指标；

5) 进一步拓展 SOS 算法的应用领域，推动以应用为导向的 SOS 算法发展。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] WOLPERT D H, MACREADY W G. No free lunch theorems for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997,1(1):67-82.
- [2] CHENG M Y, PRAYOGO D. Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm[J]. Computers & Structures, 2014,139:98-112.
- [3] 戚远航,蔡延光,蔡颢,等.带时间窗的车辆路径问题的离散蝙蝠算法[J].电子学报,2018,46(3):672-679.
- [4] EZUGWU A E, PRAYOGO D. Symbiotic organisms search algorithm: Theory, recent advances and applications[J]. Expert Systems with Applications, 2019,119:184-209.
- [5] GHAREHCHOPOGH F S, SHAYANFAR H, GHOLIZADEH H. A comprehensive survey on symbiotic organisms search algorithms[J]. Artificial Intelligence Review, 2020,53(3):2265-2312.
- [6] ABDULLAHI M, NGADI M A, DISHING S I, et al. A survey of symbiotic organisms search algorithms and applications[J]. Neural Computing and Applications, 2020,32(2):547-566.
- [7] TEJANI G G, SAVSANI V J, PATEL V K. Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2016,3(3):226-249.
- [8] KUMAR S, TEJANI G G, MIRJALILI S. Modified symbiotic organisms search for structural optimization[J]. Engineering with Computers, 2019,35(4):1269-1296.
- [9] MAKIABADI M H, MAHERI M R. An enhanced symbiotic organism search algorithm (ESOS) for the sizing design of pin connected structures[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021,45(3):1371-1396.
- [10] AL-SHARHAN S, OMRAN M G H. An enhanced symbiosis organisms search algorithm: an empirical study[J]. Neural Computing and Applications, 2018,29(11):1025-1043.
- [11] MIAO F, YAO L, ZHAO X. Symbiotic organisms search algorithm using random walk and adaptive Cauchy mutation on the feature selection of sleep staging[J]. Expert Systems with Applications, 2021,176:114887.
- [12] 周虎,赵辉,李牧东,等.多策略自适应共生生物搜索算法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(4):101-106.
- [13] 周虎,赵辉,周欢,等.自适应精英反向学习共生生物搜索算法[J].计算机工程与应用,2016,52(19):161-166.
- [14] ABDULLAHI M, NGADI M A, DISHING S I. Chaotic symbiotic organisms search for task scheduling optimization on cloud computing environment [C]//2017 6th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC). IEEE, 2017:1-4.
- [15] MOHAMMADZADEH H, GHAREHCHOPOGH F S. An efficient binary chaotic symbiotic organisms search algorithm approaches for feature selection problems[J]. The Journal of Supercomputing, 2021,77(8):9102-9144.
- [16] YALÇIN E, ÇAM E, TAPLAMACIOĞLU M C. A new chaos and global competitive ranking-based symbiotic organisms search algorithm for solving reactive power dispatch problem with discrete and continuous control variable[J]. Electrical Engineering, 2020,102(2):573-590.
- [17] SAHA S, MUKHERJEE V. Optimal placement and sizing of DGs in RDS using chaos embedded SOS algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016,10(14):3671-3680.
- [18] SAHA S, MUKHERJEE V. A novel chaos-integrated symbiotic organisms search algorithm for global optimization[J]. Soft Computing, 2018, 22(11): 3797-3816.
- [19] ABDULLAHI M, NGADI M A. Hybrid symbiotic organisms search optimization algorithm for scheduling of tasks on cloud computing environment[J]. PLoS ONE, 2016,11(8): e0158229.
- [20] SULAIMAN M, AHMAD A, KHAN A, et al. Hybridized symbiotic organism search algorithm for the optimal operation of directional overcurrent relays[J]. Complexity, 2018, 2018: 4605769.
- [21] ÇELİK E, ÖZTÜRK N. A hybrid symbiotic organisms search and simulated annealing technique applied to efficient design of PID controller for automatic voltage regulator[J]. Soft Computing, 2018,22(23):8011-8024.

- [22] EZUGWU A E, ADEWUMI A O, FRÎNCU M E. Simulated annealing based symbiotic organisms search optimization algorithm for traveling salesman problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017,77:189-210.
- [23] EZUGWU A E. Enhanced symbiotic organisms search algorithm for unrelated parallel machines manufacturing scheduling with setup times[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 172:15-32.
- [24] EZUGWU A E, ADEWUMI A O. Discrete symbiotic organisms search algorithm for travelling salesman problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017,87:70-78.
- [25] WANG Y, WU Y W, XU N. Discrete symbiotic organism search with excellence coefficients and self-escape for traveling salesman problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019,131:269-281.
- [26] LIAO T W, KUO R J. Five discrete symbiotic organisms search algorithms for simultaneous optimization of feature subset and neighborhood size of KNN classification models[J]. *Applied Soft Computing*, 2018,64:581-595.
- [27] HE W, QI X, LIU L. A novel hybrid particle swarm optimization for multi-UAV cooperate path planning[J]. *Applied Intelligence*, 2021,51(10):7350-7364.
- [28] WANG Y, GENG C, XU N. Assembly sequence optimization based on hybrid symbiotic organisms search and ant colony optimization[J]. *Soft Computing*, 2021,25(2):1447-1464.
- [29] 敖山,彭雄飞,刘志中.多角色优化策略的灰狼-共生生物搜索算法[J].*小型微型计算机系统*,2021,2(11):2276-2283.
- [30] HUO L, ZHU J, LI Z, et al. A hybrid differential symbiotic organisms search algorithm for UAV path planning[J]. *Sensors*, 2021,21(9):3037.
- [31] NGUYEN-VAN S, NGUYEN K T, LUONG V H, et al. A novel hybrid differential evolution and symbiotic organisms search algorithm for size and shape optimization of truss structures under multiple frequency constraints[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021,184:115534.
- [32] CIVICIOGLU P. Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013,219(15):8121-8144.
- [33] NAMA S, SAHA A K, SHARMA S. Performance upgradation of symbiotic organisms search by backtracking search algorithm[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2022, 13(12):5505-5546.
- [34] LENSTRA J, KAN A. Complexity of vehicle routing and scheduling problem[J]. *Network*, 1981,11(2):221-227.
- [35] TIZHOOSH H R. Opposition-Based Learning: A new scheme for machine intelligence[C]//*International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*. IEEE, 2005:695-701.
- [36] CHAKRABORTY F, NANDI D, ROY P K. Oppositional symbiotic organisms search optimization for multilevel thresholding of color image[J]. *Applied Soft Computing*, 2019,82: 105577.
- [37] GONG S, HUANG R, CAO Z. An improved symbiotic organisms search algorithm for low-yield stepper scheduling problem[C]. *Proceedings of the 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Xi'an, China: IEEE, 2017:289-294.
- [38] GUHA D, ROY P K, BANERJEE S. Quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2017,33: 46-67.
- [39] NAMA S, SAHA A K. An ensemble symbiosis organisms search algorithm and its application to real world problems[J]. *Decision Science Letters*, 2018,7(2):103-118.
- [40] TRUONG K H, NALLAGOWNDEN P, BAHARUDIN Z, et al. A quasi-oppositional-chaotic symbiotic organisms search algorithm for global optimization problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2019,77:567-583.
- [41] TRUONG K H, NALLAGOWNDEN P, ELAMVAZUTHI I, et al. A quasi-oppositional-chaotic symbiotic organisms search algorithm for optimal allocation of DG in radial distribution networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2020,88:106067.
- [42] ÇELIK E. A powerful variant of symbiotic organisms search algorithm for global optimization[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020,87:103294.
- [43] CHEN J, ZHOU Z, KARUNAKARAN V, et al. An efficient technique-based distributed energy management for hybrid MG system: A hybrid QOCSOS-RF technique[J]. *Wind Energy*, 2020,23(3):575-592.
- [44] DAS S, BHATTACHARYA A, CHAKRABORTY A K. Solution of short-term hydrothermal scheduling problem using quasi-reflected symbiotic organisms search algorithm considering multi-fuel cost characteristics of thermal generator[J]. *Arabian Journal For Science and Engineering*, 2018,43(6): 2931-2960.
- [45] 秦旋,房子涵,张赵鑫.混合共生生物搜索算法求解置换流

- 水车间调度问题[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(4):712-721.
- [46] 李阳,范厚明.求解带容量约束车辆路径问题的混合变邻域生物共栖搜索算法[J].控制与决策,2018,33(7):1190-1198.
- [47] UMAM M I H, SANTOSA B. A hybrid symbiotic organisms search algorithm with variable neighbourhood search for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problem[J]. Iop Conference, 2018,337:012005.
- [48] NAMA S, SAHA A K, GHOSH S. Improved symbiotic organisms search algorithm for solving unconstrained function optimization[J]. Decision Science Letters, 2016,5(3):361-380.
- [49] YU V F, REDI A A N P, YANG C L, et al. Symbiotic organisms search and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem[J]. Applied Soft Computing, 2017,52:657-672.
- [50] AI T J, KACHITVICHYANUKUL V. Particle swarm optimization and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009,56(1):380-387.
- [51] SECUI D C. A modified symbiotic organisms search algorithm for large scale economic dispatch problem with valve-point effects[J]. Energy, 2016,113:366-384.
- [52] SECUI D C. Large-scale multi-area economic/emission dispatch based on a new symbiotic organisms search algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2017,154:203-223.
- [53] DO D T T, LEE J. A modified symbiotic organisms search (mSOS) algorithm for optimization of pin-jointed structures[J]. Applied Soft Computing, 2017,61:683-699.
- [54] DO D T T, LEE D, LEE J. Material optimization of functionally graded plates using deep neural network and modified symbiotic organisms search for eigenvalue problems [J]. Composites Part B: Engineering, 2019,159:300-326.
- [55] TSAI H. A corrected and improved symbiotic organisms search algorithm for continuous optimization[J]. Expert Systems With Applications, 2021,177:114981.
- [56] PRAYOGO D, WONG F T, SUGIANTO S. Enhanced symbiotic organisms search (ESOS) for global numerical optimization[C]//2017 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA). IEEE, 2017:69-73.
- [57] PRAYOGO D, CHENG M Y, WONG F T, et al. Optimization model for construction project resource leveling using a novel modified symbiotic organisms search[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2018, 19(5): 625-638.
- [58] TEJANI G G, SAVSANI V J, PATEL V K, et al. Truss optimization with natural frequency bounds using improved symbiotic organisms search[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 143:162-178.
- [59] WANG Y, MA Z. Symbiotic organisms search algorithm based on asynchronous change learning strategy[J]. Recent Developments in Intelligent Computing, Communication and Devices, 2019,752:283-290.
- [60] 陈昌富,邱琳淇,毛凤山,等.基于加权扰动共生生物搜索算法桩网复合地基优化设计[J].岩土力学,2019,40(11):4477-4485;4514.
- [61] KAMANKESH H, AGELIDIS V G, KAVOUSI-FARD A. Optimal scheduling of renewable micro-grids considering plug-in hybrid electric vehicle charging demand[J]. Energy, 2016,100:285-297.
- [62] 贾鹤鸣,李瑶,姜子超,等.基于改进共生生物搜索算法的林火图像多阈值分割[J].计算机应用,2021,41(5):1465-1470.
- [63] GRANDIS H Sungkono. Modified symbiotic organisms search (SOS) algorithm for controlled-source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) one-dimensional (1D) modelling [J]. Journal of Earth System Science, 2022,131(1):61.
- [64] NGUYEN-VAN S, NGUYEN K T, DANG K D, et al. An evolutionary symbiotic organisms search for multiconstraint truss optimization under free vibration and transient behavior [J]. Advances in Engineering Software, 2021,160:103045.
- [65] CHAKRABORTY S, NAMA S, SAHA A K. An improved symbiotic organisms search algorithm for higher dimensional optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 236:107779.
- [66] BANERJEE S, CHATTOPADHYAY S. Power optimization of three dimensional turbo code using a novel modified symbiotic organism search (MSOS) algorithm[J]. Wireless Personal Communications, 2017,92(3):941-968.
- [67] 王艳娇,马壮.基于子种群拉伸操作的精英共生生物搜索算法[J].控制与决策,2019,34(7):1355-1364.
- [68] 王艳娇,陶欢欢.基于旋转学习策略的共生生物搜索算法[J].计算机应用研究,2017,34(9):2614-2617;2623.
- [69] SÖNMEZ Y, UNAL M. Estimation of smooth and non-smooth fuel cost function parameters using improved symbiotic organisms search algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020,15(1):13-25.
- [70] 高阳阳,余敏建,韩其松,等.基于改进共生生物搜索算法的空战机动决策[J].北京航空航天大学学报,2019,45(3):429-

- 436.
- [71] CHENG M Y, PRAYOGO D, WU Y W. A self-tuning least squares support vector machine for estimating the pavement rutting behavior of asphalt mixtures[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(17):7755-7768.
- [72] PRAYOGO D. Metaheuristic-based machine learning system for prediction of compressive strength based on concrete mixture properties and early-age strength test results[J]. *Civil Engineering Dimension*, 2018,20(1):21-29.
- [73] CHENG M Y, PRAYOGO D, WU Y W. Prediction of permanent deformation in asphalt pavements using a novel symbiotic organisms search-least squares support vector regression[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019,31(10): 6261-6273.
- [74] CHENG M Y, CAO M T, MENDROFA A Y J. Dynamic feature selection for accurately predicting construction productivity using symbiotic organisms search-optimized least square support vector machine[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,35:101973.
- [75] YANG C L, SUTRISNO H. A clustering-based symbiotic organisms search algorithm for high-dimensional optimization problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2020,97(B):106722.
- [76] 李昆仑,关立伟,郭昌隆. 基于聚类和改进共生演算法的云任务调度策略[J]. *计算机应用*, 2018,38(3):707-714.
- [77] CHENG M Y, PRAYOGO D, TRAN D H. Optimizing multiple-resources leveling in multiple projects using discrete symbiotic organisms search[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016,30(3):04015036.
- [78] LIU D, LI H, WANG H, et al. Discrete symbiotic organisms search method for solving large-scale time-cost trade-off problem in construction scheduling[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020,148:113230.
- [79] DU Z, PAN J, CHU S, et al. Multi-group discrete symbiotic organisms search applied in traveling salesman problems[J]. *Soft Computing*, 2022,26(9):4363-4373.
- [80] ABDULLAHI M, NGADI M A, ABDULHAMID S M. Symbiotic organism search optimization based task scheduling in cloud computing environment[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2016,56:640-650.
- [81] SHARMA M, YERMA A. Energy analysis of symbiotic organisms search optimization based task scheduling algorithm [C]//2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RT-EICT). IEEE, 2016:1421-1424.
- [82] TEJANI G G, PHOLDEE N, BUREERAT S, et al. Multiobjective adaptive symbiotic organisms search for truss optimization problems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018,161:398-414.
- [83] TEJANI G G, PHOLDEE N, BUREERAT S, et al. Structural optimization using multi-objective modified adaptive symbiotic organisms search[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019,125:425-441.
- [84] TRAN D H, CHENG M Y, PRAYOGO D. A novel multiple objective symbiotic organisms search (MOSOS) for time-cost-labor utilization tradeoff problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016,94(4):132-145.
- [85] TRAN D H, LUONG-DUC L, DUONG M T, et al. Opposition multiple objective symbiotic organisms search (OMOSOS) for time, cost, quality and work continuity tradeoff in repetitive projects[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018,5(2):160-172.
- [86] IONESCU A, VERNIC R. MOSOSS: an adapted multi-objective symbiotic organisms search for scheduling[J]. *Soft Computing*, 2021,25:9591-9607.
- [87] BAYSAL Y A, KETENCI S, ALTAS I H, et al. Multi-objective symbiotic organism search algorithm for optimal feature selection in brain computer interfaces[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021,165:113907.
- [88] SAHA S, MUKHERJEE V. A novel multiobjective chaotic symbiotic organisms search algorithm to solve optimal DG allocation problem in radial distribution system[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2019,29(5):e2839.
- [89] SAHA S, MUKHERJEE V. A novel multi-objective modified symbiotic organisms search algorithm for optimal allocation of distributed generation in radial distribution system[J]. *Neural Computing and Applications*, 2021,33(6):1751-1771.

作者简介:

李立欣,男,1996年生,硕士研究生,助理讲师,主要研究方向:复杂网络系统建模、控制与优化、物流控制与优化、智能优化。E-mail: 929351274@qq.com

蔡延光(通信作者),男,1963年生,博士研究生,教授,主要研究方向:复杂网络系统建模、控制与优化、物流控制与优化、智能交通系统、组合优化、智能优化、物联网信息处理与优化控制。E-mail: caiyg99@163.com