

# 群智能进化算法 及其应用

王艳娇 刁鹏飞 贾雁飞 著



科学出版社

# 群智能进化算法及其应用

王艳娇 刁鹏飞 贾雁飞 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面翔实地阐述了人工蜂群算法、群集蜘蛛优化算法、共生生物搜索算法、离子运动算法、引力搜索算法及海豚群算法的原理,给出了基于 MATLAB 语言的实现方法,针对静态单目标优化问题、静态多目标优化问题、动态单目标优化问题提出了多种改进算法和实现策略,并求解了无线多媒体传感器网络全目标覆盖等实际问题。

本书可供高等院校计算机科学、人工智能、自动控制和其他相关专业高年级本科生、研究生和教师阅读,也可作为群智能进化算法爱好者研究、学习的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

群智能进化算法及其应用/王艳娇,刁鹏飞,贾雁飞著. —北京:科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-059820-2

I. ①群… II. ①王… ②刁… ③贾… III. ①计算机算法-最优化算法-群集技术 IV. ①TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 276084 号

责任编辑:王 钰 吴超莉 / 责任校对:马英菊  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 19

字数: 368 000

定价: 132.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135397-2047

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

群智能进化算法是人工智能的一个重要分支，起源于对人工生命的研究，其基本思想是模拟自然界生物的群体行为来构造随机优化算法，将搜索空间中的点模拟为自然界中的个体，遵从达尔文进化论的优胜劣汰、适者生存的自然法则，即目标函数值较为优秀的个体逐渐取代目标函数值较差的个体，逐步完成迭代寻优过程。目前，群智能进化算法所处理的优化问题主要包括静态单目标无约束优化问题、静态单目标约束优化问题、静态多目标无约束优化问题、静态多目标约束优化问题、动态单目标优化问题、动态多目标优化问题、多峰函数优化问题等。群智能进化算法所展现出的良好的求解效果使其受到国内外研究者越来越多的关注，现已被成功地应用于工程实践的多个领域，显示出广阔的应用前景。

本书共分 7 章。第 1 章归纳总结了群智能进化算法的发展历程，以及各种典型优化问题及评价标准。第 2 章~第 6 章分别介绍了人工蜂群算法、群集蜘蛛优化算法、共生生物搜索算法、离子运动算法、引力搜索算法和海豚群算法，内容上既包括相关原理的基本介绍，又包括 MATLAB 具体仿真方法的介绍，同时针对静态单目标无约束优化问题、静态单目标约束优化问题、静态多目标无约束优化问题、静态多目标约束优化问题、动态单目标优化问题提出了各种改进算法和实现策略，并进行了实验仿真。第 7 章全面总结了群智能进化算法的应用领域，并针对无线多媒体传感器网络的二维全目标覆盖问题、三维全目标覆盖问题及异构无线网络接入选择问题，给出基于群智能进化算法的解决方案。希望本书的出版能对群智能进化算法的研究和推广起到一定的积极作用。

本书的主要特色如下。

1) 将目前较为新颖的 6 种群智能进化算法归纳总结于一体，翔实地介绍了相关基本理论，便于读者理解和融会贯通。

2) 归纳典型的 6 类优化问题，针对各种优化问题，给出基于群智能进化算法的改进思想和实现方案，并介绍实验测试方法，充分启发读者对其进行深入了解。

3) 对于每一个群智能进化算法都给出基于 MATLAB 语言的实现过程，便于读者动手实践。

4) 针对通信领域当前较为热门的研究问题，给出基于群智能进化算法的解决方案，便于读者实际应用，并加深对算法的理解。

本书的主要内容是在东北电力大学教师王艳娇的研究成果基础上完成的，由

其承担主要撰写工作，并邀请了其他高校教师参与本书部分内容的撰写。其中，东北林业大学工程技术学院刁鹏飞老师在算法仿真方面做了大量工作，撰写了本书的 2.4 节、3.2 节、4.2 节、5.2 节、6.3 节及 6.6 节；北华大学贾雁飞老师为 7.1 节的撰写做出了贡献。同时，在撰写期间得到了许多人的支持，硕士研究生马壮、马春蕾、陶欢欢、李晓杰、汪超、史新梦等参与了部分章节的整理校对工作，硕士研究生杜天琳、车相阳、江新天、孙晓楠等参与了全部书稿的文字校对修改工作，确保了本书的高水平、高质量。特别感谢作者父母及家人的付出和理解，感谢导师的精心指导和关心。此外，本书还参考引用了国内外大量相关学术论文和著作，在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金青年项目（项目编号：61501107、61603073）、吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目（吉教科合字 2016 第 95 号）、吉林省吉林市科技局项目（项目编号：201750219、201750227）的资助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请专家和广大读者批评指正。

作者

2018 年 6 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 群智能进化算法的发展	1
1.1.1 群体启发算法	2
1.1.2 进化启发算法	4
1.1.3 物理启发算法	6
1.2 优化问题概述	8
1.3 静态单目标优化问题	9
1.3.1 静态单目标无约束优化问题标准测试函数及性能评价标准	9
1.3.2 静态单目标约束优化问题标准测试函数及性能评价标准	10
1.4 静态多目标优化问题	11
1.4.1 静态多目标无约束优化问题标准测试函数及性能评价标准	12
1.4.2 静态多目标约束优化问题标准测试函数及性能评价标准	15
1.5 动态优化问题	16
1.5.1 动态单目标优化问题的标准测试函数及性能评价标准	16
1.5.2 动态多目标优化问题的标准测试函数及性能评价标准	18
第 2 章 人工蜂群算法	20
2.1 人工蜂群算法的生物学背景	20
2.2 人工蜂群算法的基本原理及操作流程	22
2.2.1 人工蜂群算法的基本原理	22
2.2.2 人工蜂群算法的操作流程	24
2.3 人工蜂群算法的特点和收敛性证明	25
2.3.1 人工蜂群算法的特点	25
2.3.2 人工蜂群算法的收敛性证明	27
2.4 基于 MATLAB 语言的人工蜂群算法实现	29
2.5 面向静态单目标无约束优化的改进人工蜂群算法	34
2.5.1 改进人工蜂群算法的基本原理	34
2.5.2 快速人工蜂群算法的操作流程	38

2.5.3	快速人工蜂群算法的复杂度分析	39
2.5.4	实验仿真与结果分析	39
2.6	面向静态多目标约束优化的改进人工蜂群算法	47
2.6.1	静态约束多目标人工蜂群算法的基本原理	47
2.6.2	静态约束多目标人工蜂群算法的流程与复杂度分析	51
2.6.3	实验仿真与结果分析	52
<b>第 3 章</b>	<b>群集蜘蛛优化算法</b>	<b>58</b>
3.1	群集蜘蛛优化算法的基本原理及操作流程	59
3.1.1	群集蜘蛛优化算法的基本原理	59
3.1.2	群集蜘蛛优化算法的操作流程	62
3.2	基于 MATLAB 语言的群集蜘蛛优化算法的实现	63
3.3	面向静态单目标无约束优化问题的改进群集蜘蛛优化算法	72
3.3.1	改进群集蜘蛛优化算法的基本原理	73
3.3.2	基于动态学习策略的群集蜘蛛优化算法的操作流程	76
3.3.3	实验仿真与结果分析	76
3.4	面向静态多目标无约束优化问题的群集蜘蛛优化算法	83
3.4.1	多目标群集蜘蛛优化算法的基本原理	83
3.4.2	实验仿真与结果分析	88
<b>第 4 章</b>	<b>共生生物搜索算法</b>	<b>93</b>
4.1	共生生物搜索算法的基本原理及操作流程	93
4.1.1	共生生物搜索算法基本原理	93
4.1.2	共生生物搜索算法的操作流程	95
4.2	基于 MATLAB 语言的共生生物搜索算法的实现	96
4.3	面向静态单目标无约束优化问题的基于子种群拉伸操作的精英共生生物搜索算法	99
4.3.1	基于子种群拉伸操作的精英共生生物搜索算法的基本原理	99
4.3.2	基于子种群拉伸操作的精英共生生物搜索算法的操作流程	104
4.3.3	实验仿真与结果分析	104
4.4	面向静态单目标无约束优化问题的基于混合策略的改进共生生物搜索算法	116
4.4.1	基于混合策略的共生生物搜索算法的基本原理	116
4.4.2	基于混合策略的共生生物搜索算法的操作流程	118

---

4.4.3	实验仿真与结果分析	119
4.5	面向静态单目标约束优化问题的混合约束共生生物搜索算法	122
4.5.1	约束处理技术	122
4.5.2	混合约束共生生物搜索算法的基本原理	124
4.5.3	混合约束共生生物搜索算法的操作流程	126
4.5.4	实验仿真与结果分析	127
<b>第 5 章</b>	<b>离子运动算法</b>	<b>133</b>
5.1	离子运动算法的基本原理	133
5.2	基于 MATLAB 的离子运动算法的实现	136
5.3	面向静态单目标无约束优化问题的改进离子运动算法	140
5.3.1	改进离子运动算法的基本原理	140
5.3.2	改进离子运动算法的操作流程	145
5.3.3	实验仿真与结果分析	145
5.4	面向动态单目标优化的改进离子运动算法	154
5.4.1	基于记忆策略的动态离子运动算法的基本原理	155
5.4.2	DIMO-MS 算法的操作流程	161
5.4.3	实验仿真与结果分析	162
<b>第 6 章</b>	<b>其他新型群智能进化算法</b>	<b>167</b>
6.1	引力搜索算法的基本原理及操作流程	167
6.1.1	引力搜索算法的基本原理	167
6.1.2	引力搜索算法的操作流程	168
6.2	引力搜索算法的特点和性能分析	169
6.2.1	引力搜索算法的特点	169
6.2.2	现有引力搜索算法的性能分析	170
6.3	基于 MATLAB 语言的引力搜索算法实现	171
6.4	面向静态单目标无约束优化问题的改进引力搜索算法	174
6.4.1	基于权重函数分段的引力搜索算法的基本原理	174
6.4.2	基于权重函数分段的引力搜索算法的操作流程	176
6.4.3	实验仿真与结果分析	176
6.5	海豚群算法的基本原理及操作流程	182
6.5.1	海豚群算法的基本原理	182

6.5.2	海豚群算法的操作流程 .....	186
6.6	基于 MATLAB 语言的海豚群算法的实现 .....	187
6.7	面向静态单目标无约束优化问题的跳跃海豚群算法 .....	193
6.7.1	改进的海豚群算法的基本原理 .....	193
6.7.2	跳跃海豚群算法的操作流程 .....	197
6.7.3	实验仿真与结果分析 .....	197
<b>第 7 章</b>	<b>群智能进化算法的典型应用 .....</b>	<b>207</b>
7.1	群智能进化算法的应用 .....	207
7.1.1	群智能进化算法在通信领域的应用 .....	207
7.1.2	群智能进化算法在计算机科学领域的应用 .....	208
7.1.3	群智能进化算法在电子电气工程领域的应用 .....	209
7.1.4	群智能进化算法在机械设计与制造领域的应用 .....	210
7.1.5	群智能进化算法在航空航天领域的应用 .....	211
7.1.6	群智能进化算法在机器人领域的应用 .....	212
7.1.7	群智能进化算法在环境与资源配置领域的应用 .....	213
7.1.8	群智能进化算法在交通运输领域的应用 .....	213
7.1.9	群智能进化算法在工程管理领域的应用 .....	214
7.1.10	群智能进化算法在经济领域的应用 .....	215
7.1.11	群智能进化算法在其他领域的应用 .....	215
7.2	基于人工蜂群算法的无线多媒体传感器网络二维全目标优化方法 .....	216
7.2.1	无线多媒体传感器的三维有向感知模型和全目标覆盖问题 .....	217
7.2.2	基于人工蜂群算法的面向三维有向感知模型的 WMSN 全目标覆盖方法 .....	219
7.2.3	实验仿真与结果分析 .....	224
7.3	基于万有引力算法的 WMSN 三维全目标覆盖方法 .....	228
7.3.1	WMSN 三维全目标覆盖问题描述 .....	228
7.3.2	基于 PGSA 算法的 WMSN 三维全目标覆盖方法 .....	230
7.3.3	实验仿真与结果分析 .....	232
7.4	$\varepsilon$ _CISOSAMS 在异构无线网络接入选择中的应用 .....	234
7.4.1	异构无线网络多属性决策方法 .....	235
7.4.2	基于 $\varepsilon$ _CISOSAMS 算法的异构无线网络接入选择算法 .....	237
7.4.3	实验仿真与结果分析 .....	239
	<b>主要参考文献 .....</b>	<b>245</b>

---

附录 A .....	267
附录 B .....	270
附录 C .....	273
附录 D .....	279
附录 E .....	282

# 第 1 章 绪 论

优化是人们在工程、科学、经济和社会等领域最常碰见的问题，如系统控制 (Pigatto et al., 2017)、机械设计 (Bramerdorfer et al., 2016)、网络设计 (Jung et al., 2016)、生产调度 (崔维伟等, 2014)、大规模集成电路设计 (Tolpygo et al., 2016)、生物制药 (Andrieu et al., 2017) 和经济模型 (Zhang, 2016) 等。优化技术在上述领域的应用已经产生了巨大的经济效益和社会效益。实践表明，同等条件下，经过优化技术的处理，系统效率、资源、经济效益等方面都有显著提高，而且，处理问题规模越大，相应效果也越明显。为此，设计更为高效、实用的优化算法成为国内外各领域学者广泛关注的热点课题，涉及领域包括数学、运筹学、管理科学、决策科学、经济学、计算机科学、控制科学和生物化工等。

随着工程技术和科学的发展，这些优化问题向大规模、多峰、非线性、强约束化发展，目标函数不连续、不可微，有的甚至没有明确的函数形式。基于梯度（或导数）或直接搜索的传统优化方法，如牛顿法 (Luttenberger et al., 2016)、拟牛顿法 (Byrd et al., 2016)、共轭梯度法 (Nakamura et al., 2017)、变尺度法 (Li et al., 2017)、广义乘法法 (Song et al., 2017)、序列二次规划法 (Tröltzsch, 2016)、函数逼近法 (Hosseini et al., 2016)、区间法 (Huang et al., 2016) 和隧道法 (Wajman et al., 2017) 等，由于存在以下问题而不再适用：①传统方法要求目标函数连续、可微等；②在算法实现前，要求出函数的一阶甚至高阶导数、逆矩阵等，目标函数越复杂，计算量越大；③问题的结果与初值的选取关系较大；④算法缺乏通用性，使用者需针对具体问题选择最合适的方法。为解决上述问题，许多学者从自然界中得到启发，模仿生物机制或自然现象，以种群为基础设计出了各种算法，称为群智能进化算法。由于其不受搜索空间限制条件（如可微、连续、单峰等）的约束且不需要导数等其他辅助信息，具有效率高、简单易操作、通用性强等特点，符合当前优化问题的客观要求，因此成为主流优化方法。

本章首先介绍群智能进化算法的发展；然后鉴于提出群智能进化算法的目的是处理各类优化问题，对优化问题的分类进行简要介绍；最后对典型优化问题的公开通用测试函数及评价标准进行归纳总结。

## 1.1 群智能进化算法的发展

美国教授 Holland (1975) 提出遗传算法 (genetic algorithm, GA)，在旅行商

问题 (travelling salesman problem, TSP) (Dantzig et al., 1959) 中展现出极为强大的搜索能力, 拉开了学者研究群智能进化算法的序幕。在过去 40 余年, 群智能进化算法迅猛发展, 在通信、控制等领域已广泛应用, 发挥着举足轻重的作用。总的来讲, 群智能进化算法根据算法灵感来源, 可以分为群体启发算法、进化启发算法及物理启发算法 3 类。

### 1.1.1 群体启发算法

群体启发算法是通过模拟自然界中生物的生活习性得到的, 比较有代表性的算法总结如下:

1) Colormi 等 (1991) 提出了蚁群优化算法 (ant colony optimization, ACO), 该算法的思想是依据蚂蚁之间留下的信息激素, 利用概率路径选择方法, 通过个体之间的信息交流来完成寻求全局最优解的搜索过程。该算法具有并行性、正反馈性、离散性、鲁棒性和易于与其他优化算法相结合等特点, 适合解决组合优化问题。为解决函数优化问题, Chen 等 (2017) 提出了鲁棒蚁群优化 (robust ant colony optimization, RACO) 算法。

2) Eberhart 等 (1995) 受到鸟集活动的规律性启发, 提出了粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法, 该算法具有易于实现、设置参数少等优点, 提出后迅速得到广泛应用。

3) 水域中鱼的生存数目最多的地方即为本水域中富含营养物质最多的地方, 李晓磊等 (2001) 根据这一特点来模拟鱼群的觅食行为, 提出了人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, AFSA)。

4) Liu 等 (2002) 基于大肠杆菌在人体肠道内吞噬食物的行为, 提出了细菌觅食算法 (bacterial foraging algorithm, BFA), 通过驱化、复制和驱散 3 种行为来实现寻优。

5) Karaboga 等 (2007) 基于蜜蜂觅食行为提出了人工蜂群 (artificial bee colony, ABC) 算法, 将种群分成引领蜂、跟随蜂和侦察蜂, 由于跟随蜂种群是在较优蜜源附近进行贪婪搜索, ABC 算法具有较快的收敛速度。

6) 印度学者 Krishnanand 等 (2005) 在美国电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 群体智能会议上提出了萤火虫优化 (glowworm swarm optimization, GSO) 算法。GSO 算法源于模拟自然界中萤火虫在晚上群聚活动的自然现象, 荧光素越亮的萤火虫其号召力越强, 最终会出现很多萤火虫聚集在一些荧光素较亮的萤火虫周围。此后, 来自剑桥大学的学者 Yang (2009) 根据自然界中萤火虫的发光行为提出了萤火虫算法 (firefly algorithm, FA)。

7) Chu 等 (2006) 根据猫在懒散、环顾四周状态时展现出的搜寻模式及在跟踪动态目标时展现出的状态, 提出了猫群优化 (cat swarm optimization, CSO) 算法。

8) Eusuff 等 (2006) 为解决组合优化类问题, 提出了混合蛙跳算法 (shuffled

frog leaping algorithm, SFLA), 其基本思想是: 在一片湿地内, 离散地分布着许多石头, 青蛙通过寻找不同的石头进行跳跃去找到食物最多的地方。

9) 昆虫学家对蟑螂研究发现, 与蚁群社会存在等级差别不同, 蟑螂社会是平等的, 但是每个蟑螂的行为都会引起同伴的追随, 如觅食、寻找黑暗巢穴等行为。学者 Cheng (2008) 根据蟑螂的觅食行为提出了蟑螂算法 (cockroach swarm algorithm, CSA)。

10) Zhao 等 (2008) 通过模拟自然界中猴群爬山过程中的爬、望和跳 3 个过程, 提出了猴群算法 (monkey algorithm, MA), 用于求解大规模、多峰函数优化问题。

11) 剑桥大学的 Yang 等 (2010) 通过模拟布谷鸟的寄生育雏行为, 提出了布谷鸟搜索 (cuckoo search, CS) 算法。

12) Yang (2010) 通过模拟自然界中蝙蝠利用声呐来探测猎物、避免障碍物的行为提出了蝙蝠算法 (bat algorithm, BA), 将蝙蝠利用超声波对障碍物或猎物进行最基本的探测、定位能力与优化目标功能之间建立联系。

13) Hereford 等 (2011) 提出了椋鸟群觅食 (flocking optimization, FlockOpt) 算法, 用于实际参数的优化。该算法以椋鸟群体觅食行为为基础, 来进行个体更新, 使整个群体表现出吸引力及排斥力等特征, 与粒子群算法较为相似, 但是在优化性能方面又远远高于粒子群算法。

14) 在自然界中, 群居动物的集体行为有利于动物群提高收获效率, 遵循更好的迁徙路线能够避免被捕食, 受其启发, Cuevas 等 (2012) 提出了集体动物行为 (collective animal behavior, CAB) 算法。

15) Nguyen 等 (2012) 模仿僵尸的觅食行为提出了僵尸生存优化 (zombie survival optimization, ZSO) 算法。该算法中, 僵尸 (探索者) 可在特定的区域内通过对利用空气传播的消毒剂的搜索而变回人类。

16) Gandomi 等 (2012) 通过模拟磷虾的生态行为提出了磷虾群 (krill herd, KH) 优化算法, 其基本思想如下: 每个磷虾都会受到一定范围内相邻磷虾的吸引或排斥, 进行局部寻优, 而所有磷虾的适应度决定食物的中心, 引导磷虾进行全局寻优。

17) Duman 等 (2012) 提出了候鸟优化 (migrating birds optimization, MBO) 算法, 该算法是基于候鸟 V 形飞行的自然元启发式方法, 处于 V 形队列最前方的候鸟体力消耗最快, 在体力消耗至一定程度时会被紧跟其后的两者之一取代, 如此反复循环, 从而逐步接近最优。

18) 生物界中的海豚通过回声定位搜寻周围区域的食物, 基本途径如下: 鉴于回声的强度可以帮助海豚预估猎物的位置、距离, 当海豚搜寻到较大的猎物时, 会利用不同频率的声波与同伴进行信息交流, 以此来获取更大猎物所处的位置, 引导其他海豚个体逐渐向更大猎物靠近。Kaveh 等 (2013) 根据上述特点提出了

海豚回声定位 (dolphin echolocation, DE) 算法, 该算法具有参数少、计算量小等优点。

19) Taherdangkoo 等 (2013) 受到盲、裸鼹鼠群在寻找食物和保护领地免受入侵行为的启发, 提出了盲、裸鼹鼠 (blind naked mole-rats, BNMR) 算法, 在求解数据聚类问题中具有明显优势。

20) Cuevas 等 (2014a) 根据依附于同一张蜘蛛网上的蜘蛛群体展现出来的智能行为, 提出了群集蜘蛛优化 (social spider optimization, SSO) 算法, 通过雌性种群行为、雄性种群行为及婚配行为实现寻优。

21) Mirjalili 等 (2014) 模拟灰狼群体捕食行为提出灰狼优化 (grey wolf optimization, GWO) 算法, 通过狼群跟踪、包围、追捕、攻击猎物等过程实现优化。

22) Meng 等 (2014) 模拟鸡群等级制度和鸡群行为, 提出鸡群优化 (chicken swarm optimization, CSO) 算法, 将整个鸡群分成若干子群, 每一个子群都由一只公鸡、若干母鸡和小鸡组成, 不同的鸡有不同的运动规律, 且在具体的等级制度下, 不同的鸡群之间存在一定的竞争。

23) Wang 等 (2015a) 提出了大红斑蝶优化 (monarch butterfly optimization, MBO) 算法。该算法通过模拟自然界中大红斑蝶的迁徙行为, 利用迁徙算子和调整算子确定个体的搜索方向, 并行处理实现寻优。

24) Mirjalili (2016) 提出了蜻蜓算法 (dragonfly algorithm, DA), 该算法的灵感来源于自然界中蜻蜓独特的两个聚集体, 即觅食群体和迁徙群体, 其中觅食群体中的蜻蜓会分为几个子蜻蜓群体在不同的区域飞行, 而迁徙群体中的蜻蜓会聚集成一个大的群体沿着一个方向飞行。

25) Wu 等 (2016) 通过模仿海豚实际捕食过程中所表现的生物学特性和生活习性提出了海豚群算法 (dolphin swarm algorithm, DSA)。

26) Mandal (2018) 根据干早期间象群中的每个大象找到水源之后会相互交流并产生记忆, 逐步引导象群找到最优水源的思想, 提出了象群觅水算法 (elephant swarm water search algorithm, ESWSA)。

27) Arora 等 (2018) 根据蝴蝶的觅食行为提出蝴蝶优化算法 (butterfly optimization algorithm, BOA), 该算法根据个体嗅觉来确定花蜜或交配伴侣的位置, 通过蝴蝶的位置更新实现对目标问题的求解。

### 1.1.2 进化启发算法

进化启发算法的灵感来源于遗传进化过程, 其代表性算法如下:

1) 德国的 Rechenberg (1973) 模拟生物进化原理, 假设无论基因发生何种变化, 产生的结果或性状总遵循零均值、某一方差的高斯分布, 提出了进化策略 (evolution strategy, ES)。

2) 美国学者 Holland (1975) 提出了 GA, 该算法模拟达尔文生物进化论的

自然选择学说（适者生存、优胜劣汰）和遗传学机理的生物进化过程，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。

3) Storn 等（1997）提出了差分进化算法（differential evolution, DE），其本质是一种基于实数编码的具有保优思想的遗传算法。由于差分进化算法的关键步骤——变异操作是基于群体的差异向量信息来修正各个个体的值，随着迭代次数的增加，各个个体之间的差异化信息在逐渐缩小，以至于后期收敛速度变慢，甚至有时会陷入局部最优。

4) de Castro 等（2000）基于抗体克隆选择机理相继提出了克隆选择算法（clone selection algorithm, CSA），一般包括抗原识别、初始抗体生成、亲和力计算、记忆细胞分化及抗体促进和抑制等步骤。

5) 人工免疫算法（immune algorithm, IA）（Leandro et al., 2002）的灵感来源于生物体免疫系统，简单来讲，哺乳动物的生命过程可能会遇到各种伤害，而免疫系统能够用有限的资源，有效地应对数量庞大且种类多变的病毒入侵，是抵御外来病毒侵害的防疫系统。

6) 由于人类善于观察并从他人的生活习惯中汲取经验，相比于其他动物，具有更高的生存能力。受此启发，2002年 Xie 等（2002）提出了社会认知优化（social cognitive optimization, SCO）算法，解决非线性问题。

7) Penev 等（2005）基于“以不确定应对不确定、以无穷尽应对无穷尽”的思想，提出了自由搜索（free search, FS）算法，该算法借鉴动物个体存在的不同嗅觉、机动性等特征，提出了个体灵敏度和邻域搜索半径的概念，并利用动物释放信息素的机理，通过信息素和灵敏度的比较确定各自新的寻优位置，经过不断搜索找到最优解。

8) Tan 等（2007）提出了自适应估计最大熵分布模型（adaptive estimated maximum-entropy distribution, Adaptive MEED），该算法源于如下启发：由于样本在早期阶段具有较低的平均适应度，但是在搜索过程中逐渐收敛到最优值，没有必要在搜索的早期阶段充分考虑所观察到的约束。

9) 韩国学者 Geem 等（2008）利用演奏家们为达到最美和声效果不断反复调整自己乐器音调的过程，提出了和声搜索（harmony search, HS）算法。

10) Simon（2008）在 IEEE Transaction on Evolutionary Computation 上提出了生物地理学优化（Biogeography-Based Optimization, BBO）算法，基本思想为：生物种群生活在不同的“栖息地”，受降雨量、植被的多样性、地质的多样性和气候等因素的影响，每个栖息地的适宜度有所差别，生物种群据此进行分布和迁移。

11) Premaratne 等（2009）提出了稻田算法（paddy field algorithm, PFA），该算法中目标函数的适应度值决定每种植物的数量，适应度值较好的个体会产生较多的种子，产生的种子按一定比例进行授粉，参与下一次迭代。

12) Zhang 等 (2010a) 提出约化空间搜索算法 (reduced space searching algorithm, RSSA), 该算法起源于一个简单的经验, 当人类搜索给定目标的候选解时, 通常先进行大规模粗略搜索, 如果有人成功找到线索, 则相对于预先定义的目标, 搜索空间被大大减少, 再进行更详细的搜索。

13) Shi (2011) 提出了头脑风暴优化 (brain storm optimization, BSO) 算法, 该算法源于对人类头脑风暴法会议过程的模拟。头脑风暴法会议需要一个主持人、几个待解决问题的拥有者和一组拥有不同背景的议员, 受到议员背景、经验及思维方式差异的影响, 对于相同问题, 大家会提出不同的解决方案。

14) Ashrafi 等 (2012) 提出旋律搜索 (melody search, MS) 算法, 该算法通过记忆判别、音阶调整和随机选择 3 个过程, 以找到连续性最好的旋律为目的, 逐步迭代实现寻优。

15) Rao 等 (2012) 模拟教师对学员的教学过程以及学员的学习过程, 即通过教师的“教”和学生之间的相互“学习”来提高学员的学习成绩, 提出了教与学优化 (teaching-learning-based optimization, TLBO) 算法。

16) 自然界中的两种生物相互作用时, 会产生如下 3 种结果: 其一, 对双方都有利, 称为互利共生; 其二, 对一方有利、对另一方无利也无害, 称为偏利共生; 其三, 对一方有利、对一方有害, 称为寄生。Cheng 等 (2014) 模拟这种交互作用提出了共生生物搜索 (symbiotic organisms search, SOS) 算法。

17) Li 等 (2014b) 提出了动物迁徙优化 (animal migration optimization, AMO) 算法, 其主要思想来自于绝大多数动物群体存在着无处不在的动物迁徙行为, 如哺乳类、鱼群、昆虫类、爬行动物类、鸟群、甲壳类等。

### 1.1.3 物理启发算法

物理启发算法是由物理现象受到启发而抽象出来的进化算法, 具有代表性的算法主要包括如下几种:

1) Kirkpatrick 等 (1982) 根据物理中固体物质的退火过程提出了模拟退火算法 (simulated annealing, SA), SA 从某一较高初温出发, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解, 即在陷入局部最优时能以一定概率跳出, 并最终趋于全局优化。

2) Birbil 等 (2003) 提出了类电磁元启发 (electromagnetism-like meta-heuristic, EM) 算法, 该方法利用吸引排斥机制将样本点移动到全局最优, 既可以作为独立算法, 也可以与其他算法结合进行寻优。

3) Menser 等 (2006) 受漩涡运动启发提出粒子漩涡算法 (particle swirl algorithm, PSA), 该算法的思想是基于水向排水管螺旋运动的原理, 漩涡的中心点 (称为涡流) 并不固定, 而是不断向更大的搜索空间中的当前最优解移动。由

于粒子朝向涡旋, 搜索过程集中在先前取得良好结果的区域。

4) 土耳其学者 Erol 等 (2006) 提出了宇宙大爆炸 (big bang-big crunch, BB-BC) 算法, 该算法的思想源于宇宙大爆炸和收缩理论, 该理论认为在宇宙形成过程中能量的分布是随机耗散的, 同时也会向一个局部集中收敛, 而收敛的中心在优化算法中就对应为全局最优解。

5) Shah-Hosseini (2008) 模拟自然界中河水与周围环境相互作用的过程, 提出了智能水滴 (intelligent water drops, IWD) 算法。

6) 伊朗的 Rashedi 等 (2009) 提出了引力搜索算法 (gravitational search algorithm, GSA), 该算法的思想来源于牛顿万有引力定律, 它通过种群个体之间的万有引力相互作用指导种群搜索。

7) Bayraktar 等 (2013) 模仿自然界中的大气运动提出了风力驱动优化 (wind driven optimization, WDO) 算法, 该算法在  $N$  维搜索空间中, 以一定数量、依据牛顿第二定律运动的气体微元作为其核心, 在速度更新方程中采用了额外的变量, 如重力和科里奥利力 (地球自转偏向力) 等, 提高了鲁棒性和微调精度。

8) Ochoa 等 (2010) 提出了分子激发平行回火 (molecular-inspired parallel tempering, MIPT) 算法, 该算法将分子动力学模拟的一些基本特征纳入平行回火配方中, 分子在排斥力、摩擦力和随机力的作用下在决策变量空间中运动, 两种不同类型的分子被视为探索者和提炼者, 探索者呈现较低的摩擦力, 并受到排斥力, 使它们向低分子密度区域更快地移动, 而提炼者拥有较好的目标函数值, 并受到较大的摩擦力, 使其运动受限于当前位置周围的狭窄区域。

9) Lam 等 (2010) 提出了化学反应优化 (chemical reaction optimization, CRO) 算法, 该算法主要模仿在化学反应系统中分子发生的微观现象, 即分子在化学反应中相互作用以达到低能量稳定状态, 并试图捕捉到反应产物在光电扫描器上具有的最低能量。

10) Tan 等 (2010) 受现实中烟花在空中爆炸这一现象的启发, 提出了烟花算法 (fire works algorithm, FWA), 该算法主要由爆炸算子、变异操作、映射规则和选择策略 4 个部分组成。

11) 受磁场理论的启发, Mirjalili 等 (2011) 提出了磁性优化算法 (magnetic optimization algorithm, MOA), 通过场强和粒子之间的距离改变粒子所受的合力, 进而更新粒子的加速度、速度和位置, 逐步接近最优解。

12) 折射定律指出, 当光从光疏介质射向光密介质时, 出射光线会向法线靠拢。受其启发, 伊朗的 Kaveh 等 (2013) 提出了射线优化 (ray optimization, RO) 算法, 通过个体最优解和全局最优解确定法向量, 每次迭代出射光线都向当前法线靠拢, 使所求问题逐步接近最优解。

13) Koupaei 等 (2013) 以模拟气体运动为基础, 并结合物理学及气体布朗运动的原理, 提出了一种新型的优化算法——离散气体布朗运动优化 (discrete