

INTELLIGENT OPTIMIZATION

ALGORITHMS AND

EMERGENT

COMPUTATION

李士勇 李研 林永茂 编著

智能优化算法 与涌现计算



- 本书精选106种智能优化算法与涌现计算，内容全面而新颖，具有多种学科交叉融合的前沿性。
- 全书从复杂适应系统理论高度分析智能优化算法与涌现计算的本质特征以及它们的共性和个性。
- 撰写过程由浅入深，深入浅出，突出原创算法的辩证思维方法，旨在启迪广大读者的创新思维。



清华大学出版社

INTELLIGENT OPTIMIZATION
ALGORITHMS AND
EMERGENT COMPUTATION

智能优化算法 与涌现计算

李士勇 李研 林永茂 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

智能优化正在成为智能科学、信息科学、人工智能中最为活跃的研究方向,它在科研、工程、经济、管理、国防乃至民生诸多领域发挥着越来越大的作用,并已经成为多种学科交叉融合研究的前沿课题。有关智能优化算法方面的书籍国内外已出版了很多种,但其内容的广度还远落后于该领域的快速发展。为弥补这方面的不足,本书全面地收集了国内外已提出的 106 种原创的智能优化算法,内容包括:模拟人脑及细胞、器官、系统功能的模糊逻辑算法,神经网络算法,DNA 计算,膜计算,免疫算法等 20 种;模拟生物进化的遗传算法、差分进化算法、分布估计算法、文化算法等 10 种;模拟群居动物群智能行为的蚁群优化算法、粒子群优化算法、蜂群优化算法、鸡群优化算法、狼群算法等 34 种;模拟植物生长算法、小树生长算法、种子优化算法等 10 种;模拟自然优化的水循环算法、云搜索优化算法和模拟物理、化学、数学定律的引力场算法、化学反应优化算法等 27 种。上述算法都凸现出智能性或灵性的优化特点。它们通过确定性算法加启发式随机搜索的反复迭代获取优化问题的最优数值解。同时,本书内容还包括模拟自然界中复杂适应系统涌现现象、涌现行为的一维元胞自动机、Conway 生命游戏、蚂蚁系统觅食路径、黏菌的铁路网络的涌现计算等 5 种,它们是通过人工生命的主体按简单规则在一定的环境下不断地演化来获得优化问题最优或准最优的模拟解。

本书旨在开阔读者视野,启迪读者创新思维,激励广大学者在生生不息、丰富多彩的大自然中捕捉创新灵感。本书可供人工智能、人工生命、智能科学、计算机科学、信息科学、自动化、系统科学、管理科学等相关领域的教师、研究生、研究人员及工程技术人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

智能优化算法与涌现计算/李士勇,李研,林永茂编著. —北京:清华大学出版社,2019
ISBN 978-7-302-51742-9

I. ①智… II. ①李… ②李… ③林… III. ①最优化算法 IV. ①O242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 271366 号

责任编辑:王一玲 李 晔

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:39.5

字 数:1002 千字

版 次:2019 年 8 月第 1 版

印 次:2019 年 8 月第 1 次印刷

定 价:119.00 元

产品编号:076310-01



作者简介

李士勇 哈尔滨工业大学二级教授、博士生导师，哈尔滨工业大学教学名师（2007年）、黑龙江省优秀专家（1996年）。曾被聘为国家模糊控制技术生产力促进中心专家（1997年），*Journal of Measurement Science and Instrumentation*编委。三十多年来，一直从事自动控制、模糊控制、智能控制、智能优化、智能制导、复杂适应系统的理论及其在工业过程和高技术领域的应用方面的教学、科研和研究生指导工作。科研和教学成果获国家级奖2项、省部级奖7项。发表学术论文近200篇，出版教材和专著共14部，代表作《模糊控制·神经控制和智能控制论》荣获1999年“全国优秀科技图书奖”暨“科技进步奖（科技著作）”，至今已被近6000篇论文引用，跻身于十大领域中国科技论文引用频次最高的前50部专著与译著排行榜。美国IEEE Fellow、田纳西大学J.C.Hung（洪箴）教授在1997年致信作者时曾指出：“李教授在模糊控制、神经网络（络）控制及智能控制方面有深入的理论研究和特殊的学术造诣及贡献。”

“智能”已经成为当代出现频次越来越高的词汇，这正是人类社会迈入智能时代的一个重要标志。智能正飞速地融入科学、工程、经济、国防及人类社会生活的方方面面：智能科学、智能材料、智能机器人、智能生产线、智能控制、智能预测、智能决策、智能制导、智能炸弹、智能手机、智能家电、智能家居、智能楼宇……智能水平的高低，在很大程度上已经成为衡量一个国家综合国力、科技水平高低的重要标志。

在科学研究、工程设计、经济管理、国防建设等领域存在着大量需要优化求解的复杂问题。采用传统的优化方法通常需要给出待优化问题的精确数学模型，包括决策变量、约束条件和目标函数。传统优化方法包括线性规划、动态规划、整数规划和分支定界等运筹学中的经典算法，这些算法计算复杂，只适用于小规模问题；用构造型优化算法快速建立问题的解，一般优化效果差，难以满足工程需要。总之，传统的优化算法是以给出优化问题的精确数学模型为基础的。然而，科学、工程、经济等领域提出的优化问题越来越复杂，难以建立精确的数学模型；有的问题变量维数大，阶次高，目标函数多，约束条件复杂，即使建立复杂的数学模型也难以求解。因此，面临日益复杂的优化问题，基于精确模型的传统优化算法面临着极大的挑战。

大自然中的各种生物、植物、动物及各种自然现象呈现出生生不息的景象，总是给人以深刻的启迪。人们从中发现了许多隐含其中的信息存储、处理、交换、适应、更新、进化的机制，蕴含着优化的机理。于是，人们从中获得了设计灵感。例如，模拟蚁群从蚁穴到食物源避过障碍选择一条最短路径，Dorigo 博士于 1991 年设计了蚁群优化算法，开辟了模拟群居昆虫觅食行为或动物捕猎行为的群智能优化算法的先河。除早期模拟大脑功能的模糊逻辑算法、神经网络算法及遗传算法外，近 30 年来，大量的智能优化算法在国内外犹如雨后春笋般地涌现出来。为了向广大读者全面而系统地介绍原创的智能优化算法，弥补国内外同类书籍的不足，本书精选了 106 种原创的智能优化算法，一般称它们为基本算法。本书把这些算法概括分为六大类，并分别编入六篇共 106 章加以介绍。各篇的内容概括如下。

第一篇：仿人智能优化算法，包括模拟人脑思维、人体系统、组织、器官乃至细胞及人类社会竞争进化等相关的 20 种智能优化算法。

第二篇：进化算法，包括模拟自然界的生物在生殖繁衍过程中，通过遗传和变异及“优胜劣汰”的自然选择法则，不断地进化的优化算法 10 种。

第三篇：群智能优化算法，包括模拟自然界群居昆虫的觅食、繁殖等行为或动物群体的捕猎策略等对问题求解的优化算法 34 种。

第四篇：仿植物生长算法，包括模拟花、草、树木等植物生长过程中的向光性、光合作用、根吸水性、种子繁殖、花朵授粉等表现出的自适应、竞争、进化、优化行为的算法 10 种。

第五篇：仿自然优化算法，包括模拟风、雨、云等自然现象，模拟物理、化学、数学定律，模拟生态系统的自组织临界性、混沌现象、随机分形等非线性科学的优化算法 27 种。

第六篇：涌现计算，指模拟自然界中复杂适应系统的涌现现象、涌现行为，通过人工生命的主体按简单规则在一定的环境下不断地演化来获得优化问题最优或准最优的模拟解。本篇

介绍涌现计算的 5 种例子,包括一维元胞自动机的涌现计算、Conway 生命游戏的涌现计算、蚂蚁系统觅食路径的涌现计算、数字人工生命 Autolife 的涌现行为和黏菌的铁路网络涌现计算。

本书介绍的 106 种智能优化算法,涉及从地球上的万物之灵——智能水平最高的人,到介于动物和真菌之间的低级黏菌生物;从海洋中世界上最大的哺乳动物鲸鱼到海洋微小无脊椎动物磷虾;从凶猛的野生群居动物老虎、狮子到幼小的蚂蚁、蜜蜂;从自然界的风、雨、云、雷电现象到地球上的水循环、食物链……内容涵盖面之广,可以说陆海空无所不及;从陆地到海洋,从水中到空中,从有生命的动植物、微生物到无生命的自然现象,从物理化学数学、非线性科学到复杂适应系统等。

应该指出的是,有关智能优化算法的分类还没有统一的标准,因此从不同的角度会有不同的分类方法,如自然计算、仿生计算、进化计算、智能优化算法及计算智能等。本书之所以把上述前五大类优化算法统称为智能优化算法,是因为这些算法都凸显出智能性或灵性的特点。它们通过确定性算法加启发式随机搜索的反复迭代获取优化问题的最优数值解。而涌现计算是指模拟自然界中复杂适应系统的涌现现象、行为,通过人工生命的主体按简单规则在一定的环境下不断地演化来获得优化问题最优或准最优的模拟解。

本书介绍了百余种智能优化算法和涌现计算的原创算法,目的在于使广大读者开阔视野,从复杂适应系统理论的高度上认识、理解各种智能优化算法和涌现计算的原理及其本质特征,从中受到启迪;并进一步激励人们从千变万化、五彩斑斓的大千世界中生生不息的各种生物、各种周而复始的自然现象中发现、捕捉灵感,提出、设计、创造出更多更好的智能优化算法,以满足科学、工程、经济、管理、国防等领域中各种复杂优化问题的需要。

基于上述宗旨,加之受篇幅所限,每种算法只从原创算法的提出、个体行为或习性、算法原理、算法的数学描述、算法实现等方面简要介绍,每种算法的篇幅平均控制在 5 页左右。在编写中,尽可能保持原创算法的主要内容及所用符号。为方便起见,对少数算法的符号做了适当的改动,并适当补充一些从网上收集的相关插图和对算法原理说明的辅助材料。由于本书章节多,因此将作为智能优化算法的理论基础部分的内容以附录的形式给出,便于读者单独阅读。

参加编写或提供素材的还有宁永臣、李盼池、李浩、左兴权、柏继云、张秀杰、宋申民、李巍、班晓军、赵宝江、黄金杰、袁丽英、栾秀春、黄忠报、章钱、郭成、杨丹、郭玉、张恒、张逸达、王振杨、徐宝华等。

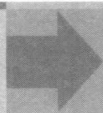
在编写过程中除引用了原创算法的文献外,还参考了国内外相关研究的主要文献及有价值的博士、硕士学位论文等,为便于读者进一步研究查阅,将这些文献一并列入本书的参考文献。在此,对被引用文献的作者表示衷心感谢!除参考文献前面的部分书籍外,文献的编号原则上是按照各章内容出现的顺序编排的。

本书的出版始终得到清华大学出版社的大力支持,在此表示由衷的谢意!

本书内容涉及专业知识面甚广,受编者知识面所限,书中内容难免存在不足,恳请广大读者给予指正!

李士勇

2018 年 5 月



第一篇 仿人智能优化算法

第 1 章 模糊逻辑算法	5
1.1 模糊集合及其表示	5
1.2 模糊集合的运算及其性质	6
1.3 模糊关系与模糊矩阵	6
1.4 模糊推理规则	7
1.5 模糊系统的万能逼近特性	8
第 2 章 神经网络算法	11
2.1 神经细胞结构与功能	11
2.2 人工神经元的基本特性	12
2.3 人工神经网络及其特点	13
2.4 前向神经网络的结构、训练及学习	14
2.5 神经网络的学习规则	16
2.6 前向网络误差反向传播学习算法及其逼近特性	17
第 3 章 免疫算法	18
3.1 免疫系统的基本概念	18
3.2 免疫系统的组织结构	18
3.3 免疫系统的免疫机制	19
3.4 免疫系统的学习及优化机理	20
3.5 免疫算法及克隆选择算法的实现步骤	22
第 4 章 内分泌算法	24
4.1 内分泌算法的提出	24
4.2 内分泌与神经、免疫系统之间的关系	24
4.3 生物内分泌系统	25
4.4 内分泌激素调节规律的描述	26
4.5 人工内分泌系统内分泌激素的调节机制	26
4.6 基于内分泌调节机制的行为自组织算法的实现	27
第 5 章 人工代谢算法	29
5.1 人工代谢算法的提出	29

5.2	人工代谢算法的原理	29
5.3	人工代谢算法的描述	30
5.4	人工代谢算法的实现流程	33
第 6 章	膜计算	35
6.1	膜计算的提出	35
6.2	细胞膜的结构、模型及功能	35
6.3	标准膜计算的原理	37
6.4	标准膜计算的描述	38
6.5	膜计算的过程及实现步骤	39
第 7 章	禁忌搜索算法	42
7.1	禁忌搜索算法的提出	42
7.2	组合优化中的邻域概念	42
7.3	局部搜索算法	43
7.4	禁忌搜索算法	44
7.5	禁忌搜索算法主要操作及参数	45
第 8 章	和声搜索算法	47
8.1	和声搜索算法的提出	47
8.2	和声搜索算法的原理及结构	47
8.3	和声搜索算法的主要步骤及流程	49
第 9 章	思维进化算法	52
9.1	思维进化算法的提出	52
9.2	思维进化算法的基本思想	52
9.3	思维进化算法的描述	53
9.4	思维进化算法的实现步骤及流程	55
第 10 章	社会进化算法	58
10.1	社会进化算法的提出	58
10.2	社会进化算法的基本思想	58
10.3	多智能体社会进化系统	59
10.4	社会进化算法的描述	60
10.5	社会进化算法的实现步骤	62
第 11 章	人口迁移算法	63
11.1	人口迁移算法的提出	63
11.2	人口迁移算法的原理	63
11.3	人口迁移算法的描述	64

11.4	人口迁移算法的实现步骤	65
第 12 章	标杆学习算法	67
12.1	标杆学习算法的提出	67
12.2	标杆管理的基本思想	67
12.3	标杆学习算法的基本原理	68
12.4	标杆学习算法的数学描述	69
12.5	标杆学习算法的实现流程	70
第 13 章	瞭望算法	72
13.1	瞭望算法的提出	72
13.2	瞭望算法的基本原理	72
13.3	瞭望算法的数学描述	73
13.4	求解全局优化问题的瞭望算法的实现	75
第 14 章	视觉认知优化算法	78
14.1	视觉认知优化算法的提出	78
14.2	视觉认知优化算法的原理	78
14.3	视觉认知优化算法的描述与步骤	79
14.4	算法的收敛性证明	80
14.5	视觉认知优化算法的实现举例	81
14.6	基于视觉认知的可视化算法	81
第 15 章	头脑风暴优化算法	83
15.1	头脑风暴优化算法的提出	83
15.2	头脑风暴优化算法的基本思想	83
15.3	头脑风暴过程的描述	84
15.4	头脑风暴优化算法的描述及实现步骤	85
15.5	基于讨论机制的头脑风暴优化算法	87
第 16 章	随机聚焦搜索优化算法	89
16.1	随机聚焦搜索优化算法的提出	89
16.2	随机聚焦搜索优化算法的原理	89
16.3	随机聚焦搜索优化算法的描述	90
16.4	随机聚焦搜索算法的基本步骤	90
16.5	基于随机聚焦搜索算法的冲压成形工艺优化	91
第 17 章	教学优化算法	94
17.1	教学优化算法的提出	94
17.2	教学优化算法的原理	94

17.3	教学优化算法的数学描述	95
17.4	教学优化算法的实现步骤	96
第 18 章	帝国竞争算法	98
18.1	帝国竞争算法的提出	98
18.2	帝国竞争算法的原理	98
18.3	帝国竞争算法的数学描述	99
18.4	帝国竞争算法的实现步骤及流程	101
第 19 章	世界杯竞赛算法	103
19.1	世界杯竞赛算法的提出	103
19.2	世界杯竞赛算法的描述	103
19.3	世界杯竞赛算法的实现流程	107
第 20 章	集体决策优化算法	108
20.1	集体决策优化算法的提出	108
20.2	集体决策优化的基本思想	108
20.3	集体决策优化算法的数学描述	109
20.4	集体决策优化算法的实现	111

第二篇 进化算法

第 21 章	遗传算法	115
21.1	遗传算法的提出	115
21.2	遗传算法的优化原理	115
21.3	生物的遗传及遗传算法的基本概念	116
21.4	遗传算法的基本操作	116
21.5	遗传算法的求解步骤	117
21.6	原对偶遗传算法	119
第 22 章	遗传编程	120
22.1	遗传编程的提出	120
22.2	遗传编程的原理及基本操作	120
22.3	遗传编程算法的设计步骤及流程	122
22.4	遗传编程算法的本质属性	123
第 23 章	进化规划	125
23.1	进化规划的提出	125
23.2	进化规划的原理及基本操作	125
23.3	进化规划的实现步骤及流程	126

第 24 章 进化策略	128
24.1 进化策略的提出	128
24.2 进化策略的基本原理	128
24.3 进化策略的基本操作	129
24.4 进化策略的实现步骤及流程	131
第 25 章 分布估计算法	133
25.1 分布估计算法的提出	133
25.2 分布估计算法的基本原理	133
25.3 分布估计算法的描述	134
25.4 分布估计算法的基本步骤及流程	135
第 26 章 差分进化算法	138
26.1 差分进化算法的提出	138
26.2 差分进化算法的原理	138
26.3 差分进化算法的基本操作	139
26.4 差分进化算法的实现步骤及流程	141
26.5 差分进化算法的扩展形式	142
第 27 章 DNA 计算	143
27.1 DNA 计算的提出	143
27.2 DNA 计算的生物学基础	143
27.3 DNA 计算的基本原理及主要步骤	144
27.4 DNA 计算的基本操作	145
27.5 DNA 计算的编码问题	148
27.6 DNA 计算系统的原型	149
第 28 章 基因表达式编程算法	150
28.1 基因表达式编程算法的提出	150
28.2 基因表达式编程算法的原理	150
28.3 基因表达式编程的基本概念	151
28.4 GEP 算法的遗传操作	153
28.5 基本的 GEP 算法流程	154
第 29 章 Memetic 算法	155
29.1 Memetic 算法的提出	155
29.2 Memetic 算法的原理	155
29.3 Memetic 算法的描述	156
29.4 Memetic 算法的流程	158

29.5	Memetic 算法的特点及其意义	159
第 30 章	文化算法	160
30.1	文化算法的提出	160
30.2	文化算法的基本结构与原理	160
30.3	文化算法求解约束优化问题的描述与设计	161
30.4	基本文化算法的实现步骤及流程	167
第三篇 群智能优化算法		
第 31 章	蚁群优化算法/蚁狮优化算法	175
31.1	蚁群优化算法的提出	175
31.2	蚂蚁的习性及其觅食行为	175
31.3	蚁群觅食策略的优化原理	176
31.4	蚁群算法的原型——蚂蚁系统模型的描述	177
31.5	基本蚁群算法的流程	179
31.6	蚁狮优化算法的提出	180
31.7	蚁狮的狩猎行为	180
31.8	蚁狮优化算法的原理	181
31.9	蚁狮优化算法的数学描述	181
31.10	蚁狮优化算法的实现	183
第 32 章	粒子群优化算法	184
32.1	粒子群优化算法的提出	184
32.2	粒子群优化算法的基本原理	184
32.3	粒子群优化算法的描述	185
32.4	粒子群优化算法的实现步骤及流程	186
32.5	粒子群优化算法的特点及其改进	187
第 33 章	人工蜂群算法/蜂群优化算法	188
33.1	蜂群算法的提出	188
33.2	人工蜂群算法的基本原理	188
33.3	人工蜂群算法的描述	190
33.4	人工蜂群算法的实现步骤与流程	191
33.5	基于蜜蜂繁殖行为的蜂群优化算法	192
第 34 章	混合蛙跳算法	196
34.1	混合蛙跳算法的提出	196
34.2	混合蛙跳算法的基本原理	196
34.3	基本混合蛙跳算法的描述	197

34.4	混合蛙跳算法的实现步骤	199
34.5	混合蛙跳算法的流程	200
第 35 章	人工鱼群算法	201
35.1	人工鱼群算法的提出	201
35.2	动物自治体模型与鱼类的觅食行为	201
35.3	人工鱼群算法的基本原理	202
35.4	人工鱼群算法的数学描述	203
35.5	人工鱼群算法的流程	205
第 36 章	大马哈鱼洄游算法	206
36.1	大马哈鱼洄游算法的提出	206
36.2	大马哈鱼的洄游习性	206
36.3	大马哈鱼洄游算法的原理	207
36.4	大马哈鱼洄游算法的描述	208
36.5	大马哈鱼洄游算法的实现步骤及流程	208
第 37 章	鲸鱼优化算法	210
37.1	鲸鱼优化算法的提出	210
37.2	鲸鱼的泡泡网觅食行为	210
37.3	鲸鱼优化算法的原理	211
37.4	鲸鱼优化算法的数学描述	211
37.5	鲸鱼优化算法的实现步骤及流程	213
第 38 章	磷虾群算法	215
38.1	磷虾群算法的提出	215
38.2	磷虾群算法的原理	215
38.3	磷虾群算法的数学描述	216
38.4	磷虾群算法的实现步骤及流程	219
第 39 章	细菌觅食优化算法	221
39.1	细菌觅食优化算法的提出	221
39.2	大肠杆菌的结构及觅食行为	221
39.3	细菌觅食优化算法的原理	222
39.4	细菌觅食优化算法的数学描述	223
39.5	细菌觅食优化算法的实现步骤及流程	225
第 40 章	细菌(群体)趋药性算法	227
40.1	细菌(群体)趋药性算法的提出	227
40.2	细菌趋药性算法的原理	227

40.3	细菌趋药性算法的数学描述	228
40.4	细菌群体趋药性算法的基本思想	229
40.5	细菌群体趋药性算法的数学描述	230
40.6	细菌群体趋药性算法的实现步骤	231
第 41 章	细菌菌落优化算法	233
41.1	细菌菌落优化算法的提出	233
41.2	细菌的生长、繁殖、死亡过程	233
41.3	细菌菌落优化算法的原理	234
41.4	细菌菌落优化算法的设计	234
41.5	细菌菌落优化算法的实现步骤及流程	235
第 42 章	猫群优化算法	238
42.1	猫群优化算法的提出	238
42.2	猫的习性	238
42.3	猫群优化算法的原理	239
42.4	猫群优化算法的数学描述	240
42.5	猫群优化算法的实现步骤	241
42.6	猫群优化算法实现的程序流程	242
第 43 章	鼠群优化算法	243
43.1	鼠群优化算法的提出	243
43.2	鼠群优化算法的原理	243
43.3	鼠群优化算法及其环境描述	244
43.4	鼠群优化算法的实现步骤	246
第 44 章	猫鼠种群算法	248
44.1	猫鼠种群算法提出	248
44.2	猫鼠种群算法的原理	248
44.3	猫鼠种群算法的数学描述	249
44.4	猫鼠种群算法的实现步骤及流程	251
第 45 章	鸡群优化算法	253
45.1	鸡群优化算法的提出	253
45.2	鸡群优化算法的基本思想	253
45.3	鸡群优化算法的数学描述	254
45.4	鸡群优化算法的实现步骤及流程	255
第 46 章	狼群算法	257
46.1	狼群算法的提出	257

46.2	狼的习性 & 狼群特征	257
46.3	狼群算法的原理	258
46.4	狼群算法的数学描述	259
46.5	狼群算法的实现步骤及流程	261
第 47 章	灰狼优化算法	262
47.1	灰狼优化算法的提出	262
47.2	灰狼的社会等级及狩猎行为	262
47.3	灰狼优化算法的数学描述	263
47.4	灰狼优化算法的实现步骤及流程	265
第 48 章	狮子优化算法	267
48.1	狮子优化算法的提出	267
48.2	狮子的习性	267
48.3	狮子优化算法的原理	268
48.4	狮子优化算法的数学描述	268
48.5	狮子优化算法的实现	271
第 49 章	猴群算法	272
49.1	猴群算法的提出	272
49.2	猴群算法的原理	272
49.3	猴群算法的数学描述	273
49.4	猴群算法的实现步骤及流程	275
第 50 章	雁群优化算法	276
50.1	雁群优化算法的提出	276
50.2	雁群飞行规则及其假设	276
50.3	雁群优化算法的基本思想	278
50.4	雁群优化算法的数学描述	279
50.5	雁群优化算法的实现步骤及流程	280
第 51 章	候鸟优化算法	281
51.1	候鸟优化算法的提出	281
51.2	候鸟 V 字形编队飞行的优化原理	281
51.3	候鸟优化算法的描述	283
51.4	候鸟优化算法的实现步骤及流程	283
51.5	候鸟优化算法的特点及参数分析	284
第 52 章	布谷鸟搜索算法	286
52.1	布谷鸟搜索算法的提出	286

52.2	布谷鸟的繁殖行为与 Levy 飞行	286
52.3	布谷鸟搜索算法的原理	288
52.4	布谷鸟搜索算法的数学描述	289
52.5	布谷鸟搜索算法的实现步骤及流程	290
第 53 章	萤火虫群优化算法/萤火虫算法	291
53.1	萤火虫群优化算法的提出	291
53.2	萤火虫闪光的特点及功能	291
53.3	萤火虫群优化算法的数学描述	292
53.4	萤火虫群优化算法的实现步骤及流程	293
53.5	萤火虫算法的基本思想	294
53.6	萤火虫算法的数学描述	294
53.7	萤火虫算法的实现步骤及流程	295
第 54 章	飞蛾扑火优化算法	297
54.1	飞蛾扑火优化算法的提出	297
54.2	飞蛾的横向导航方法	297
54.3	飞蛾扑火的原理	298
54.4	飞蛾扑火优化算法的数学描述	298
54.5	飞蛾扑火优化算法的实现步骤	301
第 55 章	蝙蝠算法	303
55.1	蝙蝠算法的提出	303
55.2	蝙蝠的习性 & 回声定位	303
55.3	蝙蝠算法的基本思想	304
55.4	蝙蝠算法的数学描述	305
55.5	蝙蝠算法的实现步骤及流程	306
第 56 章	果蝇优化算法	308
56.1	果蝇优化算法的提出	308
56.2	果蝇的生物价值及觅食行为	308
56.3	果蝇优化算法的基本原理	309
56.4	果蝇优化算法的数学描述	309
56.5	果蝇优化算法的实现步骤及流程	310
第 57 章	群居蜘蛛优化算法	312
57.1	群居蜘蛛优化算法的提出	312
57.2	蜘蛛的习性与特征	312
57.3	群居蜘蛛优化算法的基本思想	313
57.4	群居蜘蛛优化算法的数学描述	314

57.5	蜘蛛优化算法的实现步骤及流程	317
第 58 章	蟑螂优化算法	319
58.1	蟑螂优化算法的提出	319
58.2	蟑螂的习性	319
58.3	蟑螂优化算法的原理	320
58.4	蟑螂优化算法的数学描述	320
58.5	蟑螂优化算法的实现步骤	322
第 59 章	捕食搜索算法	324
59.1	捕食搜索算法的提出	324
59.2	动物捕食策略	324
59.3	捕食搜索算法的基本思想	325
59.4	捕食搜索算法的数学描述	326
59.5	捕食搜索算法的实现步骤及流程	327
第 60 章	自由搜索算法	329
60.1	自由搜索算法的提出	329
60.2	自由搜索算法的优化原理	330
60.3	自由搜索算法的数学描述	330
60.4	自由搜索算法的实现步骤及流程	332
第 61 章	食物链算法	333
61.1	食物链算法的提出	333
61.2	捕食食物链	333
61.3	人工捕食策略	334
61.4	人工生命食物链的基本思想	335
61.5	食物链算法的数学描述	335
61.6	食物链算法的实现步骤及流程	336
第 62 章	共生生物搜索算法	338
62.1	共生生物搜索算法的提出	338
62.2	共生生物搜索算法的原理	338
62.3	共生生物搜索算法的数学描述	339
62.4	SOS 算法的实现步骤及流程	340
第 63 章	生物地理学优化算法	342
63.1	生物地理学优化算法的提出	342
63.2	生物地理学的基本概念及生物物种迁移模型	342
63.3	生物地理学优化算法的原理	345