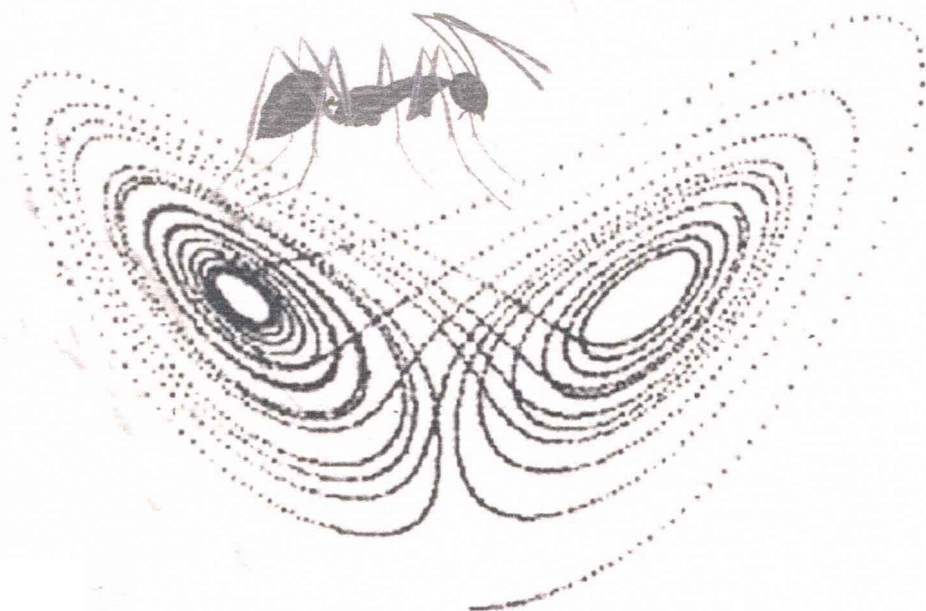


中国科协三峡科技出版资助计划

混沌蚁群 算法及应用

李丽香 彭海朋 杨义先 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

混沌蚁群算法及应用

李丽香 彭海朋 杨义先 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

混沌蚁群算法及应用/李丽香, 彭海朋, 杨义先著. —北京:
中国科学技术出版社, 2012. 12
(中国科协三峡科技出版资助计划)
ISBN 978 - 7 - 5046 - 6280 - 4

I. ①混… II. ①李… ②彭… ③杨… III. ①混沌理
论 - 算法理论 - 研究 IV. ① O415. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 311560 号

总 策 划	沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹	责任编辑	周晓慧 王 丽 张利梅
项 目 策 划	杨书宣 赵崇海	责任校对	孟华英
出 版 人	苏 青	印刷监制	李春利
编辑组组长	吕建华 许 英 赵 晖	责任印制	张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62103349
传 真 010 - 62103166
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16
字 数 350 千字
印 张 17.25
版 次 2013 年 1 月第 1 版
印 次 2013 年 1 月第 1 次印刷
印 刷 北京华联印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6280 - 4/O · 162
定 价 70.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为19世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士学位论文获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

我由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

中国长江三峡集团公司董事长



2012年12月

前 言

混沌是存在于非线性系统中的一种较为普遍的非线性现象，它并不是一片“混乱”，而是有着精致内在结构的一类非线性现象。混沌的特性主要有伪随机性、遍历性和对初始条件的敏感性。由于遍历性可作为避免搜索过程陷入局部极小的有效机制，因此混沌理论已成为一种新颖且有潜力的优化工具。

20 世纪 90 年代初，受蚁群可在巢和食物源间建立最短路径的著名试验的启发，学者 Marco Dorigo 首先开创性地提出了著名的蚁群优化算法，此后群智能理论研究迅速展开。由于群智能理论在生产计划与调度、商业运作、金融管理、电子技术、通讯、自动控制、光学、生物学等许多领域中具有巨大的应用潜力及发展前景，已经引起国内外学者的广泛关注，从而成为近期计算机、运筹学和智能控制等领域研究中的热点及前沿。

现有的受蚂蚁种群行为启发而产生的优化算法，大多都是基于随机搜索机制的非确定性的概率理论发展而来的。但是近年来生物学家 Cole 发现整个蚁群行为是一种周期行为，然而单个蚂蚁的行为却是混沌行为。蚁群显然是具有智能的团队，这个团队在不断地协作完成一个又一个任务，我们认为种群周期行为的产生正是蚂蚁由独自作业到自组织起来协作完成一个又一个任务的过程。从动力学的角度来说，显然单个蚂蚁的混沌行为和种群强大的自组织能力之间必然存在着某种内在的关系。这种关系是蚁群对周围生存环境适应性的一种自然选择，这些行为有利于蚂蚁的生存。然而混沌现象用 Marco Dorigo 依据概率理论建立的蚁群优化模型是无法解释的。单个蚂蚁的混沌行为与群体的自组织和蚁群捕食以及最短路径的建立之间是一种什么关系，这一点目前并没有引起国际群智能理论研究者广泛

的关注。

本书从全新的角度分析了蚂蚁外出捕食、在巢和食物源之间建立最短路径的过程。我们通过构造一个“巢—食物源—巢”之间的映射关系，将蚂蚁的外出捕食过程和建立最短食物路径过程统一起来进行考虑。认为蚂蚁的外出捕食过程是一个混沌搜索的过程，最短食物路径的建立过程则是由混沌搜索逐渐过渡到暂态混沌直到收敛到最短食物路径的过程。也就是说，蚂蚁处于一个在信息素和混沌共同作用下的自组织过程，一个类似于混沌退火的过程。在整个过程中蚂蚁通过不断的分泌信息素来传递最好路径信息，并通过信息素形成自组织。我们所提的这个思想完全不同于 Marco Dorigo 的关于蚁群通过概率选择来建立最短路径的思想。

受蚂蚁外出捕食和建立巢和食物源之间建立最短路径行为的启发，基于混沌搜索机理、自组织理论和群理论，我们创造性地构建了一个新的解决最优化问题的数学模型。这个模型不但可以解释蚂蚁的混沌搜索行为（此时蚂蚁并没有被组织起来），而且可以解释群体建立最佳食物路径的过程。它可以用来表示一种新的在搜索空间中求解非线性函数的全局最优解或者次优解的启发式搜索算法。

为了进一步测试算法的有效性、可行性以及算法应用领域范围，我们还开展了混沌蚁群优化算法在动力学系统参数辨识、模糊系统设计、神经网络训练、PID 控制器参数整定、数据聚类、Web 用户聚类、Web 用户行为预取、电力系统负荷经济调度、方程求根、数据拟合、整数规划、组合优化等方面的应用研究，取得了很好的效果，并且研究了多种改进算法，从而形成了一个关于群智能优化的理论方案。

本书作者在过去近 10 年间群体智能领域的科研工作中，得到了不少国内外同行的协助和支持，在此表示衷心的感谢。其中特别要提到的是：关新平教授参加了最早期关于神经网络、混沌控制和混沌同步的论文的讨论和撰写工作；卢辉斌教授参加了最早期关于蚂蚁种群优化算法的讨论和程序仿真工作；王向东教授参加了我博士生阶段的关于基于蚂蚁混沌行为的算法思想讨论及英文论文的撰写工作；蔡杰进教授进行了混沌蚁群优化算

法在电力系统方面的应用研究工作；唐英干教授进行了基于混沌蚁群优化算法的分数阶 PID 控制器的设计、时滞动力学系统辨识等方面的研究工作；李玉英博士进行了混沌蚁群优化算法的在数学领域方面的应用及设计了多种改进算法；万森博士将混沌蚁群算法应用于数据聚类、数据分类、Web 用户预取、Web 用户聚类等领域；葛方阵教授将混沌蚁群算法应用于组合优化、分布式协同优化等方面；Jürgen Kurths 教授和 Hans Joachim Schellnhuber 教授多次跟我讨论混沌蚂蚁的思想和参与相关的论文修改工作。

本书的出版得到了中国科协三峡科技出版资助计划的资助，在此表示衷心的感谢。作者还要感谢中国科学技术出版社及编辑高立波、王丽、夏凤金、张利梅对本书顺利出版的大力支持。作者杨义先感谢国家自然科学基金（编号：61121061），作者李丽香感谢全国博士学位论文作者专项资金资助项目（编号：200951）、国家自然科学基金（编号：61170269），中国博士后特别基金（编号：2012T50209），作者彭海朋感谢国家自然科学基金（编号：61100204）对于本书部分研究内容的资助。

鉴于本书作者水平有限，书中不妥或者错误之处在所难免，因此，敬请专家和读者不吝赐教，把对本书的所有意见及时反馈给我们，在此表示衷心的感谢。

李丽香 彭海朋 杨义先

2012 年 9 月

Preface

Chaos is a general nonlinear phenomenon that lies in the nonlinear system. It is not a mess of “disorder”, but a class of nonlinear phenomenon that has exquisite intrinsic structure. It has the following main characteristics: quasi – randomness; ergodicity; sensitive dependence on initial conditions. Since ergodicity is an effective mechanism to avoid trapping into local minima in the searching process, chaos has been a novel and potential optimization tool.

In the early 1990s, inspired by a well – known experiment of finding the shortest route between a nest and a food source, a famous scholar Marco Dorigo first proposed a well – known ant colony optimization algorithm. From then on, the research of swarm intelligence theory rapidly extended. The swarm intelligence theory has attracted wide attentions from international and inland scholars. It has become the hotspots and frontal problems due to its potential developments and applications in many areas of science and technology such as manufacture arrangement and scheduling, business operation, finance administration, electronics, communication, automatic control, optics, biology and etc.

Much of the existing developed ant – inspired optimization algorithms are based on the random metaheuristic of non – deterministic probability theory. However, it has been discovered by a biologist Cole that an ant colony exhibits a periodic behavior, while single ants show chaotic activity patterns. The ant colony has an intelligent team which continually accomplished tasks. We believe that the existence of colony periodic behavior is the process that individual ants works and then they present a self – organization behavior and corporate to finish complex tasks. From the aspect of dynamics, it is evident that chaotic behavior of individual ant must have an inherent relation with the strong self – organization a-

bility of ant colony. Their relations are adaptations to the surrounding environment. These behaviors are very important for the ant to survive. However, the ant colony optimization model that was given by Marco Dorigo based on probability theory could not explain the chaotic phenomenon. And the problem of how the chaotic behavior of single ant relates to the self – organizing and foraging behaviors of ant colony has received little concerns.

From a novel aspect, this book analyzes the process that ants go out for foraging, build the nest and find the shortest route. We construct a map relation between food source and the nest, and consider the process of the ants' foraging and the process of chaotic search as a whole. And the process of the ants' foraging as that of chaotic search. The building of shortest food route is the process in which the chaotic search continually transforms into the transient chaos until the process converges the shortest food route. That is to say, the ant is in the self – organization process under the impacts of pheromone trails and chaos. It is similar to the process of chaos annealing. In the whole process, ants transfer the best trail information through emitting pheromone continually and form the self – organization through pheromone. The above idea is different from that of Marco Dorigo.

Inspired by the behaviors of ants foraging and building the shortest trail between the nest and food source, and based on chaos search mechanism, self – organization theory and swarm theory, we construct a new mathematical model (called Chaotic Ant Swarm) in a creative way in order to solve the optimization problems. The model not only can explain the chaotic search behavior of ants (at this time the ant does not been organized) , but also can explain the process that ants build the best food source. This model can be used to implement a metaheuristic for the search of a global optimum or near optimum of a nonlinear function in a search space.

In order to verify the feasibility, effectiveness and the application fields of the proposed algorithm, further, this book deals with the chaotic ant swarm (CAS) algorithm and its applications in parameter estimation, fuzzy system de-

sign, neural network training, PID controller parameter tuning, etc. and attained many good results. Thus, the new scheme of swarm intelligence optimization is formed.

The authors of this book have obtained many helps and supports from international and domestic scholars in their cooperative research works on swarm intelligence optimization for the past ten years. We express our heartfelt thanks for them. Especially, Prof. Guan Xinping early took part in the papers discussion and writing works on neural network, chaos control and chaos synchronization; Prof. Lu Huibin early took part in the discussion and simulation works on ant colony optimization algorithm; Prof. Wang Xiangdong took part in the inspiration idea discussion and English paper writing works on the proposed algorithm based on chaotic behavior of ants; Prof. Cai Jiejin studied the application of chaotic ant swarm on the power system optimization; Prof. Tang Yinggan studied the design of fractional – PID controller and the identification of time – delay dynamical systems based on CAS algorithm; Dr. Li Yuying studied several applications of CAS on the mathematical field and designed many modifications of CAS; Dr. Wan Miao studied the applications of CAS in data clustering, data classification, web user preselection, web user clustering, etc.; Prof. Ge Fangzhen applied chaotic ant swarm algorithm into the fields of combinatorial optimization, distributed system collaborative optimization and etc.; Prof. Jürgen Kurths and Prof. Hans Joachim Schellnhuber discussed the idea of chaotic ant and took part in the modification of my papers for many times with me.

The publication of this book obtained the foundation of China Association for Science and Technology Sanxia Science and Technique Publication Subsidy Program. We express our heartfelt thanks for the foundation. The authors also thank Gao Libo, Wang Li, Xia Fengjin, Zhang Limei etc. in the China Science and Technology Press edited, reviewed this book and supported the successful publication of the book. Yang Yixian thanks the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61121061), Li Lixiang thanks the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China (Grant

No. 200951), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61170269), the China Postdoctoral Science Foundation funded project (Grant No. 2012T50209), Peng Haipeng thanks the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61100204) for their funds about the research contents of this book.

In view of the limited knowledge levels of the authors, it is inevitable for the book to have something wrong or unsuitable. Therefore, we expect all the criticisms from all the experts and the readers. Please give us the feedback of all the comments on the book. We express our heartfelt thanks for this.

Li Lixiang, Peng Haipeng, Yang Yixian

September 2012

目 录

总 序	曹广晶
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 群体智能理论简介	2
1.3 群体智能算法简介	9
1.4 混沌优化理论简介	14
1.5 本书算法的新思想	17
1.6 本章小结	19
第 2 章 混沌蚁群优化算法	20
2.1 引言	20
2.2 蚂蚁的混沌行为和自组织行为	21
2.3 混沌蚁群算法的数学模型	22
2.4 蚂蚁的邻居以及蚂蚁间的信息交流方式	25
2.5 混沌蚁群模型的非线性动力学行为	27
2.6 用无约束函数测试混沌蚁群算法	31
2.7 用有约束函数测试混沌蚁群算法	35
2.8 算法讨论	39
2.9 本章小结	41
第 3 章 基于 CAS 算法的动力学系统参数辨识	42
3.1 引言	42
3.2 用 CAS 算法辨识系统参数	44

3.3	目标函数和未知参数的关系	45
3.4	四种典型系统的参数辨识数值仿真研究	52
3.5	Logistic 和 Lorenz 系统的参数辨识仿真研究	58
3.6	本章小结	62
第 4 章	基于 CAS 算法的模糊系统设计	63
4.1	引言	63
4.2	T-S 模糊系统建模	65
4.3	利用 CAS 算法设计模糊系统	67
4.4	基于 CAS 的模糊系统应用研究	68
4.5	基于 CAS 的模糊系统数值仿真实例	70
4.6	本章小结	76
第 5 章	基于 CAS 算法的神经网络训练	78
5.1	引言	78
5.2	神经网络简介	79
5.3	用 CAS 算法训练 BP 网	81
5.4	CAS 算法训练 BP 网仿真实例	83
5.5	本章小结	86
第 6 章	基于 CAS 算法的 PID 参数整定	87
6.1	引言	87
6.2	PID 控制器的标准结构	88
6.3	PID 参数整定方法	90
6.4	AVR 系统的结构	91
6.5	CAS-PID 控制在 AVR 系统中的应用	92
6.6	CAS-PID 控制的 AVR 系统仿真研究	94
6.7	本章小结	100
第 7 章	基于 CAS 算法的聚类算法	101
7.1	引言	101

7.2	聚类分析	102
7.3	CAS - C 算法原理与流程	105
7.4	对比算法	108
7.5	聚类的评价指标	110
7.6	CAS - C 算法聚类的仿真实验	111
7.7	本章小结	117
第 8 章	基于随机索引的 Web 用户建模和聚类算法	118
8.1	引言	118
8.2	随机索引	119
8.3	加权随机索引	120
8.4	基于 RI 的用户建模和聚类过程	122
8.5	评价指标和比对方法	124
8.6	参数讨论	126
8.7	实验结果分析	131
8.8	本章小结	131
第 9 章	基于 CAS - C 算法的 Web 用户聚类	132
9.1	引言	132
9.2	Web 用户行为分析	133
9.3	实验方案	135
9.4	数据预处理	137
9.5	Web 用户访问模型建立	139
9.6	Web 用户聚类实验	141
9.7	本章小结	146
第 10 章	基于公共用户访问行为的 Web 预取	148
10.1	引言	148
10.2	算法评价	149
10.3	预取方案	149

10.4	实验结果分析	153
10.5	本章小结	157
第 11 章	基于 CAS 算法的电力系统负荷经济调度研究	158
11.1	引言	158
11.2	电力系统经济调度的数学模型	159
11.3	蚁群优化算法概况	160
11.4	基于 CAS 的电力系统经济调度模型	160
11.5	算例研究及结果分析	162
11.6	基于 CAS 算法的经济调度求解方法的应用	169
11.7	本章小结	171
第 12 章	CAS 算法在数学领域中的一些应用	173
12.1	CAS 算法在方程求根中的应用	173
12.2	CAS 算法在数据拟合中的应用	178
12.3	CAS 算法在整数规划中的应用	180
12.4	本章小结	185
第 13 章	用 CAS 算法求解组合优化问题	186
13.1	引言	186
13.2	求解旅行商问题的集中式算法	187
13.3	求解传感器网络任务分配的分布式算法	198
13.4	本章小结	208
第 14 章	基于三种策略的改进 CAS 算法	209
14.1	引言	209
14.2	基于三种改进策略的 ICAS 算法	209
14.3	ICAS 算法仿真实验	212
14.4	ICAS 算法在 PID 参数整定中的应用	217
14.5	本章小结	218
第 15 章	混合 CAS 算法	219
15.1	HCAS 算法的演化公式	219

15.2 预选择操作 220

15.3 离散重组操作 220

15.4 HCAS 算法的流程 221

15.5 仿真实验 222

15.6 本章小结 228

参考文献 229