

蚁群算法原理及其应用

Ant Colony Algorithms: Theory and Applications

段海滨 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了蚁群算法的原理及其应用,力图概括国内外在这一学术领域的最新研究进展。全书共包括10章,主要内容包括蚁群算法的思想起源、研究现状及机制原理;蚁群算法的复杂度分析;蚁群算法的收敛性证明;蚁群算法参数对其性能的影响;蚁群算法的参数选择原则;离散域和连续域蚁群算法的若干改进策略;蚁群算法在多个优化领域的典型应用;蚁群算法的硬件实现技术;蚁群算法与其他仿生优化算法的比较与融合;蚁群算法的研究展望;最后还在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码和相关网站。

本书内容取材新颖,覆盖面较广,深入浅出,系统性强,注重理论联系实际,力求使读者能较快掌握和应用这一新兴的仿生优化算法。

本书可作为计算机科学、控制科学、人工智能、管理科学等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可供理工科其他专业的师生参考,还可供利用计算机从事智能优化的科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

蚁群算法原理及其应用/段海滨著.—北京:科学出版社,2005.12
ISBN 7-03-016204-8

I. 蚁… II. 段… III. 智能控制—算法 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第098539号

责任编辑:王淑兰 赵卫江/责任校对:栢连海

责任印制:吕春珉/封面设计:王浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年12月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年7月第二次印刷 印张:29

印数:3 001—5 000 字数:552 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62130750 (TB06)

序

仿生优化算法是人工智能研究领域中一个重要的分支，其中包括模拟生物界中自然选择和遗传机制的遗传算法、模拟蚂蚁群体觅食行为的蚁群算法以及模拟鸟类群体捕食行为的微粒群算法等。

蚁群算法最初由意大利学者 Dorigo M 于 1991 年首次提出，其本质上是一个复杂的智能系统，它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点。如今这一新兴的仿生优化算法已经成为人工智能领域的一个研究热点。目前对其研究已渗透到多个应用领域，并由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题。如今在国内外许多学术期刊和重要国际会议上，蚁群算法已成为交叉学科中一个非常活跃的前沿性研究问题。

段海滨博士多年来一直从事蚁群算法方面的研究工作，并在该领域有着丰厚的研究积累。该书包含了作者在蚁群算法理论及应用方面的研究成果，同时也吸纳了国内外许多有代表性的研究进展。

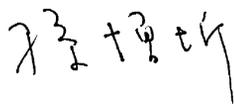
该书在系统研究蚁群算法的机制原理、理论分析及其在离散域和连续域的若干改进策略的基础上，阐述了蚁群算法在多个优化领域的典型应用，探讨了蚁群算法的硬件实现，研究了蚁群算法与其他仿生优化算法的融合策略，展望了蚁群算法的发展方向。

为了便于读者学习和研究，该书在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码及相关的网站资源。因此，该书不仅具有较高的学术价值，而且对工程应用也具有较好的参考价值和指导意义。

该书取材新颖，覆盖面广，结构合理。内容阐述深入浅出，条理清晰，注重理论联系实际，具有前瞻性和创新性，较好地体现了在这一研究领域的最新进展。

该书可作为高等院校和科研院所的计算机科学、人工智能、控制科学、管理科学、系统工程、电力电子、机械工程和生命科学等专业的广大师生及科技工作者的学习参考书。

目前国内系统地介绍蚁群算法的专著还比较匮乏，该书的出版在一定程度上弥补了这个不足。相信它的出版将对蚁群算法的发展和应用起到积极的推动作用。



2005 年 10 月

前 言

蚁群算法是一种最新发展的模拟昆虫王国中蚂蚁群体觅食行为的仿生优化算法，该算法采用了正反馈并行自催化机制，具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点，在解决许多复杂优化问题方面已经展现出其优异的性能和巨大的发展潜力，近几年吸引了国内外许多学者对其进行了多方面的研究工作。国际著名的顶级学术刊物《Nature》曾多次对蚁群算法的研究成果进行报道，《Future Generation Computer Systems》和《IEEE Transactions on Evolutionary Computation》分别于2000年和2002年出版了蚁群算法特刊，在布鲁塞尔每两年召开一次的蚁群算法国际研讨会进一步促进了这一智能计算领域的学术交流，从而使这种新兴的仿生优化算法展现出勃勃生机，其应用范围完全可与遗传算法相媲美。目前，蚁群算法已成为国际智能计算领域中备受关注的研究热点和前沿性课题。

本书是作者多年来在对蚁群算法理论及其应用所进行的一系列深入研究的基础上撰写而成的，同时吸纳了国内外许多具有代表性的最新研究成果。全书内容取材新颖，覆盖面较广，深入浅出，注重理论联系实际，力图体现国内外在这一学术领域的最新研究进展。本书可作为计算机科学、控制科学、人工智能、管理科学等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书，也可供理工科其他专业的师生参考，还可供利用计算机从事智能优化的科技工作者阅读和参考。

全书共包括10章，第1章是引论，主要介绍了蚁群算法的思想起源和研究现状；第2章阐述了基本蚁群算法的机制原理、系统学特征、数学模型及具体实现，并对其复杂度作了深入分析；第3章对蚁群算法的收敛性问题进行了深入研究和理论证明；第4章通过大量的实验数据分析了不同蚁群算法模型中诸多关联参数对其性能的影响，并给出了其主要参数的选择原则；第5章和第6章分别对离散域和连续域蚁群算法的若干改进策略进行了研究；第7章阐述了蚁群算法在多个优化领域的典型应用；第8章介绍了蚁群算法的硬件实现技术；第9章将蚁群算法同目前比较流行的几种仿生优化算法的做了比较，并给出了蚁群算法与这些仿生优化算法的融合策略；第10章展望了蚁群算法的研究方向和发展前景；最后，还在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码和相关网站资源，并附上了书中出现的中英文词汇对照及缩略语。全书的10章内容（连同附录）基本构成了一个完整的封闭体系。

值此，作者非常感谢王道波教授、高镇洋教授、陈宗基教授、张平教授、周锐教授、郭锁凤教授、温卫东教授、孙久厚教授、夏品奇教授以及朱家强博士

后、罗德林博士在本书撰写过程中所给予的支持和帮助；特别感谢中国人工智能学会副理事长、清华大学智能技术与系统国家重点实验室孙增圻教授在百忙之中认真审阅了书稿，提出了许多宝贵的修改建议，并欣然为本书作序。没有他们的惠教、支持与鼓励，就不可能有本书稿的诞生。另外，在写作过程中参考了大量的最新文献，这里也向这些文献的作者们致以诚挚的谢意！衷心感谢培养我的母校——南京航空航天大学，特别感谢南京航空航天大学研究生院对本书出版的全额资助，也非常感谢北京航空航天大学自动化学院领导和老师们对我的支持和帮助，同时，也感谢科学出版社王淑兰等编辑在本书出版过程中所付出的辛勤劳动！

目前国内系统研究蚁群算法的书籍和资料还十分匮乏，我非常希望能献给大家一本既有理论又重视实践的好书，尽管罄尽全力，但囿于水平，且时间紧促，书中错误和不妥之处在所难免。凡此，恳请各位专家、学者及广大读者不吝指正。

段海滨

2005年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 蚂蚁的生物学特征	2
1.3 蚁群算法的思想起源	8
1.4 蚁群算法的研究进展	11
1.5 本书的体系结构	15
1.6 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 基本蚁群算法原理及其复杂度分析	24
2.1 引言	24
2.2 基本蚁群算法的原理	24
2.3 基本蚁群算法的系统学特征	26
2.4 基本蚁群算法的数学模型	29
2.5 基本蚁群算法的具体实现	36
2.6 基本蚁群算法的复杂度分析	39
2.7 基本蚁群算法的性能评价指标	42
2.8 本章小结	42
参考文献	43
第 3 章 蚁群算法的收敛性研究	45
3.1 引言	45
3.2 图搜索蚂蚁系统 (GBAS) 的收敛性研究	45
3.3 一类改进蚁群算法的收敛性证明	59
3.4 GBAS/tdev 和 GBAS/tldb 的确定性收敛证明	65
3.5 基本蚁群算法的 A. S. 收敛性研究	72
3.6 一类分布式蚂蚁路由算法的收敛性研究	76
3.7 基于分支路由和 Wiener 过程的蚁群算法收敛性证明	81
3.8 一种简单蚁群算法及其收敛性分析	84
3.9 遗传-蚁群算法的 Markov 收敛性分析	90
3.10 一类广义蚁群算法 (GACA) 的收敛性分析	93
3.11 本章小结	97
参考文献	98

第 4 章 蚁群算法的实验分析及参数选择原则	100
4.1 引言	100
4.2 蚁群行为和参数对算法性能影响的实验分析	100
4.3 蚁群算法参数最优组合的“三步走”方法	116
4.4 本章小结	117
参考文献.....	117
第 5 章 离散域蚁群算法的改进研究	119
5.1 引言	119
5.2 自适应蚁群算法	119
5.3 基于去交叉局部优化策略的蚁群算法	125
5.4 基于信息素扩散的蚁群算法	130
5.5 多态蚁群算法	135
5.6 基于模式学习的小窗口蚁群算法	139
5.7 基于混合行为的蚁群算法	144
5.8 带聚类处理的蚁群算法	148
5.9 基于云模型理论的蚁群算法	153
5.10 具有感觉和知觉特征的蚁群算法.....	157
5.11 具有随机扰动特性的蚁群算法.....	166
5.12 基于信息熵的改进蚁群算法.....	169
5.13 本章小结.....	172
参考文献.....	172
第 6 章 连续域蚁群算法的改进研究	175
6.1 引言	175
6.2 基于网格划分策略的连续域蚁群算法	176
6.3 基于信息量分布函数的连续域蚁群算法	179
6.4 连续域优化问题的自适应蚁群算法	183
6.5 基于交叉变异操作的连续域蚁群算法	187
6.6 嵌入确定性搜索的连续域蚁群算法	190
6.7 基于密集非递阶的连续交互式蚁群算法 (CIACA)	194
6.8 多目标优化问题的连续域蚁群算法	201
6.9 复杂多阶段连续决策问题的动态窗口蚁群算法	205
6.10 本章小结.....	209
参考文献.....	209
第 7 章 蚁群算法的典型应用	212
7.1 引言	212
7.2 车间作业调度问题	212

7.3	网络路由问题	225
7.4	车辆路径问题	238
7.5	机器人领域	249
7.6	电力系统	258
7.7	故障诊断	268
7.8	控制参数优化	272
7.9	系统辨识	282
7.10	聚类分析	290
7.11	数据挖掘	297
7.12	图像处理	302
7.13	航迹规划	306
7.14	空战决策	310
7.15	岩土工程	315
7.16	化学工业	319
7.17	生命科学	323
7.18	布局优化	327
7.19	本章小结	331
	参考文献	332
第8章	蚁群算法的硬件实现	343
8.1	引言	343
8.2	仿生硬件概述	343
8.3	基于FPGA的蚁群算法硬件实现	346
8.4	基于蚁群算法和遗传算法动态融合的软硬件划分	360
8.5	本章小结	371
	参考文献	372
第9章	蚁群算法同其他仿生优化算法的比较与融合	374
9.1	引言	374
9.2	其他几种仿生优化算法的基本原理	374
9.3	蚁群算法与其他仿生优化算法的异同比较	382
9.4	蚁群算法与遗传算法的融合	385
9.5	蚁群算法与人工神经网络的融合	390
9.6	蚁群算法与微粒群算法的融合	398
9.7	蚁群算法与人工免疫算法的融合	402
9.8	本章小结	410
	参考文献	410

第 10 章 展望	414
10.1 引言	414
10.2 蚁群算法的模型改进	414
10.3 蚁群算法的理论分析	415
10.4 蚁群算法的并行实现	416
10.5 蚁群算法的应用领域	417
10.6 蚁群算法的硬件实现	418
10.7 蚁群算法的智能融合	418
10.8 本章小结	419
参考文献	419
附录 A 基本蚁群算法程序	421
A.1 C 语言版	421
A.2 Matlab 语言版	426
A.3 Visual Basic 语言版	432
附录 B 相关网站	439
附录 C 基本术语 (中英文对照) 及缩略语	441
附录 D (词一首) 鹧鸪天·蚁群算法	447

ABSTRACT

In ant societies, the activities of the individuals, as well as of the society as a whole, are not regulated by any explicit form of centralized control. On the other hand, adaptive and robust behaviors transcending the behavioral repertoire of the single individual can be easily observed at society level. These complex global behaviors are the result of self-organizing dynamics driven by local interactions and communications among a number of relatively simple individuals. The simultaneous presence of these and other fascinating and unique characteristics have made ant societies an attractive and inspiring model for building new algorithms and new multi-agent systems. In the last decade, ant societies have been taken as a reference for an ever growing body of scientific work.

Among the different works inspired by ant colonies, the ant colony algorithm (ACA) is probably the most successful and popular one. ACA is a novel bio-inspired optimization algorithm, which simulates the foraging behavior of ants for solving various complex combinatorial optimization problems. This book clearly defines ACA and its complexities, and presents both the most significant theoretical achievements and the state-of-the-art of ACA applications, especially the hardware realization of ACA. This book is broadly divided into 10 chapters and is organized as follows.

Chapter 1 starts with a description of the biological characteristics ants. On the basis of the introduction of the idea origins of ACA, the development of ACA is illustrated.

Chapter 2 presents a well-structured definition of basic ACA, and detailed implementation process and complexity analyses of basic ACA are also presented in this chapter.

Chapter 3 is dedicated to discuss the in-depth convergence proofs for specific classes of ACAs.

Chapter 4 presents detailed experimental analyses on the effect of pertinent parameters and ant colony behaviors in ACA, and an effective “three-step” method for optimum configuration of pertinent parameters in ACA is concluded in this chapter.

Chapter 5 is devoted to the explanation of improvement strategies of ACA

in discrete space optimization, and this description takes advantage of the traveling salesman problem (TSP).

Chapter 6 is devoted to the explanation of improvement strategies of ACA in continuous space optimization.

Chapter 7 presents the state-of-the-art of ACA typical applications in various fields. The main application principles, that is, rules of thumb to be followed when attacking a new problem, are identified and discussed in this chapter.

Chapter 8 reports on what is currently known about the hardware realization of ACA.

Chapter 9 presents a systematic comparison and detailed combination of ACA and other bio-inspired optimization algorithms.

Chapter 10 outlines some ongoing and most promising research trends in ACA.

Finally, there are four appendixes, which are programs of basic ACA, web sources about ACA, terminology (Chinese-English) and a piece of poetry extolling ACA.

This book is intended primarily for (1) advanced undergraduate and graduate students in computer science, cybernetics, management science and other related majors; (2) academic and industry researchers in artificial intelligence and computational intelligence; (3) practitioners willing to learn how to implement ACA to solve various combinational optimization problems.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Biological Characteristics of Ants	2
1.3 Idea Origins of Ant Colony Algorithm(ACA)	8
1.4 Development of ACA	11
1.5 Outline of the Book	15
1.6 Summary	18
References	18
Chapter 2 Principles and Complexity Analysis of Basic ACA	24
2.1 Introduction	24
2.2 Principles of Basic ACA	24
2.3 Systematic Characteristics of Basic ACA	26
2.4 Mathematical Model of Basic ACA	29
2.5 Implementation of Basic ACA	36
2.6 Complexity Analysis of Basic ACA	39
2.7 Performance Criteria of Basic ACA	42
2.8 Summary	42
References	43
Chapter 3 Convergence Proofs for ACAs	45
3.1 Introduction	45
3.2 Convergence Proof for the Graph-based Ant System (GBAS)	45
3.3 Short Convergence Proof for a Class of Improved ACA	59
3.4 Deterministic Convergence Proof for GBAS/tdev and GBAS/tdlb	65
3.5 A. S. Convergence Proof for Basic ACA	72
3.6 Convergence Results for a Class of Distributed Ant Routing Algorithms	76
3.7 Branching Process and Branching Wiener Process based ACA	81
3.8 Convergence Analysis for a simple ACA	84
3.9 Markov Convergence Analysis for the Combination of ACA and Genetic Algorithm (GA)	90

3. 10	Convergence Analysis for a Class of Generalized ACA (GACA)	93
3. 11	Summary	97
	References	98
Chapter 4	Experimental Analysis of ACA and Optimum Configuration	
	Principles of Pertinent Parameters in ACA	100
4. 1	Introduction	100
4. 2	Experimental Analysis of the Effect of Pertinent Parameters and Ant Colony Behaviors in ACA	100
4. 3	“Three-step” Method for Optimum Configuration of Pertinent Parameters in ACA	116
4. 4	Summary	117
	References	117
Chapter 5	Improved ACAs in Discrete Space Optimization	119
5. 1	Introduction	119
5. 2	Self-adaptive ACA	119
5. 3	Cross-removing and Local Optimization Strategies based ACA	125
5. 4	Pheromone Diffusion based ACA	130
5. 5	Polymorphic ACA	135
5. 6	Model-learning based Little-window ACA	139
5. 7	Hybrid Behavior based ACA	144
5. 8	Improved ACA with Clustering	148
5. 9	Cloud Models Theory based ACA	153
5. 10	Sensational and Consciousness ACA	157
5. 11	Improved ACA with Random Perturbation Behavior	166
5. 12	Information Entropy based ACA	169
5. 13	Summary	172
	References	172
Chapter 6	Improved ACAs in Continuous Space Optimization	175
6. 1	Introduction	175
6. 2	Gridding Partition based ACA	176
6. 3	Trail Distributed Function based ACA	179
6. 4	Self-adaptive ACA for Solving Continuous Space Optimization Problems	183
6. 5	Cross and Mutation Operation based ACA	187
6. 6	Improved ACA with Embedded Deterministic Searching	190

6. 7	Dense Heterarchy Continuous Interacting ACA	194
6. 8	Improved ACA for Multiobjective Optimization Problems	201
6. 9	Dynamic-window-search ACA for Complex Multistage Decision-making Problems	205
6. 10	Summary	209
	References	209
Chapter 7	Typical Applications of ACA	212
7. 1	Introduction	212
7. 2	Job-shop Scheduling Problem (JSP)	212
7. 3	Network Routing Problem	225
7. 4	Vehicle Routing Problem (VRP)	238
7. 5	Robot Field	249
7. 6	Power System	258
7. 7	Fault Diagnosis	268
7. 8	Parameter Optimization	272
7. 9	System Identification	282
7. 10	Clustering Analysis	290
7. 11	Data Mining	297
7. 12	Image Processing	302
7. 13	Route Planning	306
7. 14	Air-combat Decision-making	310
7. 15	Geotechnical Engineering	315
7. 16	Chemical Industry	319
7. 17	Life Science	323
7. 18	Layout Optimization	327
7. 19	Summary	331
	References	332
Chapter 8	Hardware Realization of ACA	343
8. 1	Introduction	343
8. 2	Overview of Bio-inspired Hardware	343
8. 3	FPGA Implementation of ACA	346
8. 4	Hardware/Software Partitioning based on Dynamic Combination of ACA and GA	360
8. 5	Summary	371
	References	372

Chapter 9	Comparison and Combination of ACA and Other Bio-inspired Optimization Algorithms	374
9.1	Introduction	374
9.2	Principles of Several Typical Bio-inspired Optimization Algorithms	374
9.3	Comparison of ACA and Other Bio-inspired Optimization Algorithms	382
9.4	Combination of ACA and GA	385
9.5	Combination of ACA and Artificial Neural Network(ANN)	390
9.6	Combination of ACA and Particle Swarm Optimization(PSO)	398
9.7	Combination of ACA and Artificial Immune Algorithm(AIA)	402
9.8	Summary	410
	References	410
Chapter 10	Prospects	414
10.1	Introduction	414
10.2	Model Improvement of ACA	414
10.3	Theoretical Analysis of ACA	415
10.4	Parallelization of ACA	416
10.5	Application Fields of ACA	417
10.6	Hardware Realization of ACA	418
10.7	Intelligent Combination of ACA	418
10.8	Summary	419
	References	419
Appendix A	Programs of Basic ACA	421
A.1	C Language Version	421
A.2	Matlab Language Version	426
A.3	Visual Basic Language Version	432
Appendix B	Web Sources about ACA	439
Appendix C	Terminology (Chinese-English) and Abbreviations	441
Appendix D	(Poetry) Zhe Hu Tian · ACA	447

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

自然界一直是人类创造力的丰富源泉，人类认识事物的能力来源于与自然界的相互作用之中。自然界中的许多自适应优化现象不断给人以启示：生物体和自然生态系统可通过自身的演化就使许多在人类看起来高度复杂的优化问题得到完美的解决。近些年来，一些与经典的数学规划原理截然不同的、试图通过模拟自然生态系统机制以求解复杂优化问题的仿生优化算法相继出现(如遗传算法、蚁群算法、微粒群算法、人工免疫算法、人工鱼群算法、混合蛙跳算法等)，大大丰富了现代优化技术，也为那些传统最优化技术难以处理的组合优化问题提供了切实可行的解决方案。伴随着模拟自然与生物机理为特征的仿生优化算法时代的悄然兴起，一些仿生优化算法已在经典 NP-C 问题的求解和实际应用中显示出强大的生命力和进一步发展的潜力。

生物学家通过对蚂蚁的长期观察研究发现，每只蚂蚁的智能并不高，看起来没有集中的指挥，但它们却能协同工作，集中食物，建起坚固漂亮的蚁穴并抚养后代，依靠群体能力发挥出超出个体的智能。蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)是最新发展的一种模拟昆虫王国中蚂蚁群体智能行为的仿生优化算法^[1]，它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法相结合等优点^[2, 3]。尽管蚁群算法的严格理论基础尚未奠定，国内外的相关研究还处于实验探索和初步应用阶段，但是目前人们对蚁群算法的研究已经由当初单一的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)领域渗透到了多个应用领域，由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题，由离散域范围内的研究逐渐拓展到了连续域范围内的研究^[4, 5]，而且在蚁群算法的硬件实现上也取得了很多突破性的研究进展，从而使这种新兴的仿生优化算法展现出勃勃生机和广阔的发展前景。

本章首先阐述了蚂蚁的社会形态，随后分析了蚂蚁群体“寻找食物”、“任务分配”及“构造墓地”三种社会行为，接下来在总结真实蚂蚁和人工蚂蚁之间异同点的基础上，阐述了蚁群算法的思想起源，紧接着评述了蚁群算法的发展现状，同时列举了部分具有代表性的蚁群算法及其应用情况，最后给出了本书的组织结构以及各章所包括的主要内容。

1.2 蚂蚁的生物学特征

蚂蚁又称“玄驹”、“蚍蜉”或“状元子”，是一种既渺小而又平常的社会性昆虫。在分类上，蚂蚁属于节肢动物门、昆虫纲、膜翅目、蚁科，它在昆虫界种类最多、生存量最大。蚂蚁的起源可追溯到一亿年前的恐龙时代，那时地球上就有蚂蚁的祖先繁衍。随着地球生态环境的变迁，身躯庞大的恐龙早已灭绝了，而身躯细小的蚂蚁在弱肉强食、物竞天择的自然界依靠集体的力量和顽强的生命力一直生存繁衍到今天，而且形成了家庭兴旺的蚂蚁王国。目前，全世界的蚂蚁约有 260 属，16000 多种，其中已命名的蚂蚁有 9000 多种。据生态学家估计，地球上蚂蚁总重量约占陆生动物总量的 10%；科学家曾做过计算，蚂蚁能把比自己重 1400 倍的食物拖回家去，能举起超过自身体重 400 倍的物体，无愧于动物世界中的“大力士”这一美誉。

1.2.1 蚂蚁的社会形态^[6~9]

蚂蚁在 8000 万年之前就建立了自己的社会，而我们人类只有 5000 余年的文明史。人类的许多城市都有不少都市问题，可是小小的蚂蚁却能建立起组织完好的复杂“城市”。有许多“蚂蚁城市”往往由 5000 万个成员组成，而在人类社会人口较为稠密的城市也不过才 1000 多万人。

蚂蚁有四种不同的蚁型，即蚁后、雄蚁、工蚁和兵蚁。不同的蚁型有不同的分工：蚁后被称作“蚂蚁女王”，其生殖能力很强，主要职责是产卵、繁殖后代和管理蚂蚁家族，她可根据食物多少决定自己是否生育，还可根据筑巢和建立新群体所需的蚂蚁数量来调节其“人口”结构；雄蚁具有发达的生殖器官，其主要职能是与蚁后交配；工蚁是没有生殖能力的雄性，其主要职责是建造巢穴、采集食物、伺喂幼蚁和蚁后等；兵蚁的头比较大，上颚发达，可以粉碎坚硬食物，在保卫群体时即成为战斗的武器。

化学通信是蚂蚁采取的基本信息交流方式，自然界中的蚂蚁会分泌一种化学刺激物——信息素(pheromone)。蚂蚁的许多行为受信息素调控，如蚁后分泌名为“女皇物质”的信息素来控制工蚁的发育。遇警时，信息素可刺激蚁群兴奋，具有使蚁群按计划执行某项任务的作用。蚂蚁特有的控制自身环境的能力，是在其社会行为不断发展的过程中获得的。

虽然“蚂蚁王国”是个极端母性的社会，但“蚂蚁王国”的蚂蚁们彼此都是平等的，就连“蚂蚁女王”也仅仅具有生儿育女的作用。虽然蚁后是其他蚂蚁的母亲，但她不具有任何领导地位。所有的家庭成员都相互平等，各尽其责，为家族的兴旺贡献力量。蚂蚁社会是家族社会，在这个社会中，所有的家庭成员都是

“一家人”。而且蚂蚁都是“利他主义”者，只要符合集体利益的需要，它们可以献出自己的生命。蚂蚁对同类极其友善，且习惯把食物送给饥饿的伙伴吃。每只蚂蚁都有一个附属胃，当它的同伴需要时，可把附属胃中储存的食物献给对方。可以说，“蚂蚁王国”是一个永远协调一致的“共和国”。

1.2.2 蚂蚁的群体行为

尽管蚂蚁个体比较简单，但整个蚂蚁群体却表现为高度机构化的社会组织，在许多情况下能完成远远超过蚂蚁个体能力的复杂任务^[10]。这种能力来源于蚂蚁群体中的个体协作行为，其群体行为主要包括寻找食物、任务分配和构造墓地等三种。

1.2.2.1 寻找食物

自然界中，蚂蚁的食物源总是随机散布于蚁巢周围。我们只要仔细观察就可以发现，经过一段时间后，蚂蚁总能找到一条从蚁巢到食物源的最短路径。

单只蚂蚁的能力和智力非常简单，但它们通过相互协调、分工、合作完成不论工蚁还是蚁后都不可能具有足够能力来指挥完成的筑巢、觅食、迁徙、清扫蚁穴等复杂行为，比如蚂蚁在觅食过程中能够通过相互协作找到食物源和巢穴之间的最短路径^[11, 12]。在现实生活中，我们总可以观察到大量蚂蚁在巢穴与食物源之间形成近乎直线的路径，而不是曲线或者圆等其他形状，如图 1.1(a)所示。蚂蚁群体不仅能完成复杂的任务，而且还能适应环境的变化，如在蚁群运动路线上突然出现障碍物时，一开始各只蚂蚁分布是均匀的，不管路径长短，蚂蚁总是先按同等概率选择各条路径，如图 1.1(b)所示。蚂蚁在运动过程中，能够在其经过的路径上留下信息素，而且能感知这种物质的存在及其强度，并以此指导自己运动的方向，蚂蚁倾向于信息素浓度高的方向移动。相等时间内较短路径上的信息量就遗留得比较多，则选择较短路径的蚂蚁也随之增多，如图 1.1(c)所示。不难看出，由于大量蚂蚁组成的蚁群集体行为表现出了一种信息正反馈现象，即某一路径上走过的蚂蚁越多，则后来者选择该路径的概率就越大，蚂蚁个体之间就是通过这种信息交流机制来搜索食物，并最终沿着最短路径行进，如图 1.1(d)所示。

Goss S 等曾于 1989 年做了著名的“双桥”实验^[13]，如图 1.2 所示。其中，图 1.2(a)是“双桥”实验的真实照片，图 1.2(b)给出了“双桥”实验中非对称桥的尺寸，图 1.2(c)和图 1.2(d)分别为实验进行 4 分钟和 8 分钟时的情况。该实验表明，蚁群最终会选择一条从巢穴到食物源(觅食区)的最短路径。

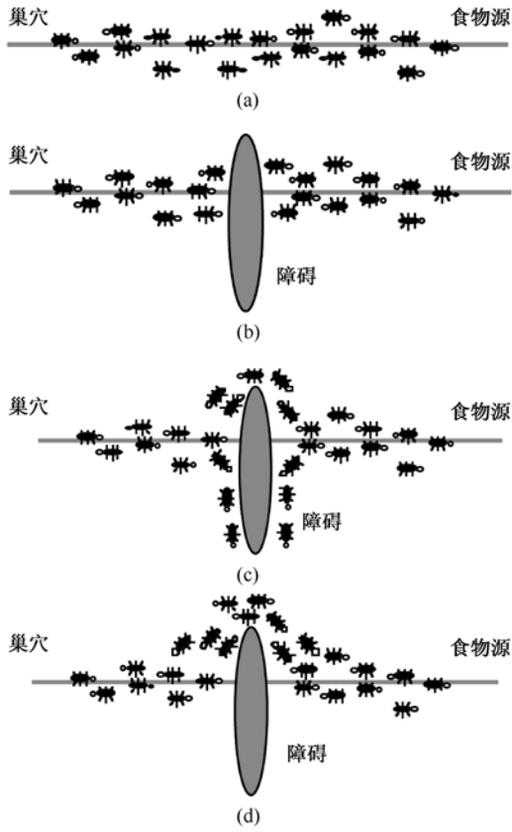


图 1.1 现实中蚁群寻找食物的过程

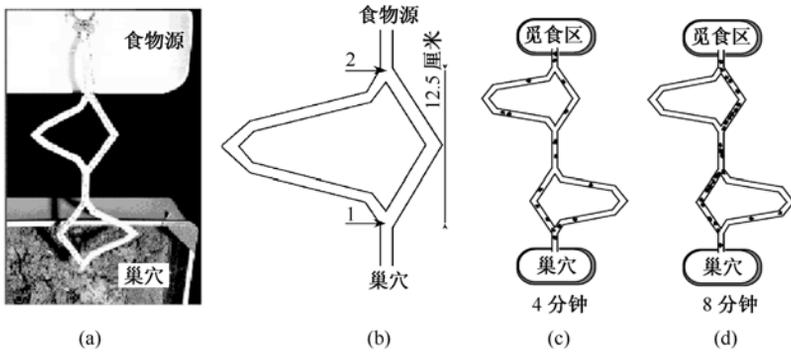


图 1.2 蚁群觅食的“双桥”实验

Goss S 等通过进一步研究, 给出了“双桥”实验的数学模型^[13]。首先, 假设在非对称桥上的信息量与过去一个时间段内经过该桥的蚂蚁数目成正比; 其次, 假设某一时刻蚂蚁按照桥上残留信息量的多少来选择其中某座桥, 经过该桥的蚂蚁数目越多, 则该桥上的残留信息量就越大。该实例中, 假设短桥为 A , 长桥为 B , A_m 和 B_m 分别表示经过桥 A 和桥 B 的蚂蚁数目 ($A_m + B_m = m$), 则当所有 m 只蚂蚁都经过两座桥之后, 第 $m + 1$ 只蚂蚁选择桥 A 的概率为

$$P_A(m) = \frac{(A_m + k)^h}{(A_m + k)^h + (B_m + k)^h} \quad (1.2.1)$$

而选择桥 B 的概率为

$$P_B(m) = 1 - P_A(m) \quad (1.2.2)$$

式中, 参数 h 和 k 用以匹配真实实验数据。第 $m + 1$ 只蚂蚁首先按照公式 (1.2.1) 计算选择概率 $P_A(m)$, 然后生成一个在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 φ , 若 $\varphi \leq P_A(m)$, 则选择桥 A ; 否则选择桥 B 。

对蚁群觅食过程的计算机动态模拟如图 1.3 所示^[14], 其中食物源 1、食物源 2 及食物源 3 是随机放置在蚁巢周围且与蚁巢距离不等的 3 个等量食物源, 觅食的最终结果是距蚁巢最近的食物源的路径上聚集的蚂蚁数目最多, 其觅食过程体现了蚁群从无序到有序的动态优化过程。

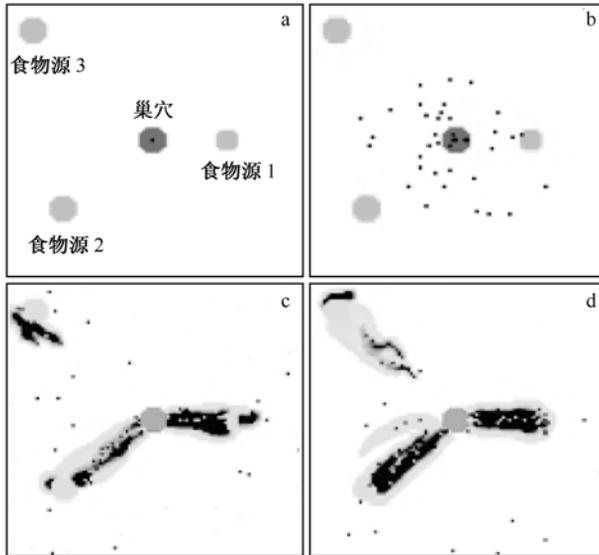


图 1.3 蚁群觅食过程的计算机动态模拟

1.2.2.2 任务分配

任务分配是蚂蚁群体行为中又一个非常显著的特点。蚁群中各个蚂蚁都有不同的分工，每只蚂蚁对不同任务的响应也是不完全相同的，但是它们可通过角色的协调和相互的协作来很好地完成许多任务。蚂蚁的任务分配可大致分为两个层次：第一个层次的划分一般可分为从事繁殖的个体和从事日常工作的个体；又可对从事日常工作的个体作进一步划分，即可分为寻找食物的蚂蚁和建筑巢穴的蚂蚁^[15]。蚂蚁是在没有任何指导信息的情况下进行上述分配的，在这种任务分配过程中存在着一种科学的动态平衡。

蚂蚁对任务响应的行为与现实中生产调度、动态任务分配等问题很相似。当正在执行任务的蚂蚁受到外界环境所赋予的新任务时，相当于受到一个刺激。当蚂蚁受到的刺激较小时，蚂蚁仍然保持原有的状态；而当蚂蚁受到的刺激大于其激活阈值时，蚂蚁就会去处理相应的新任务。当新任务不被处理时，它就会开始影响蚂蚁的行为。随着时间的推移，其紧迫程度也越来越高，紧迫程度高的新任务就使得蚂蚁不能忽视它，有时候蚂蚁可能需要放下正在进行的任务转而去处理更加紧迫的工作。当新任务被处理后，这一新任务的紧迫度就会下降，从而不会引起蚂蚁的注意。环境中的新任务可能动态地产生，因此蚂蚁也相应地在环境中移动，以便及时响应新任务的出现。

1.2.2.3 构造墓地

生物学家通过长期观察发现，蚂蚁通常构筑一个固定场所的墓地，尽管蚂蚁并不知道关于蚂蚁整体的任何指导性信息，但它可将死去的同伴安放在一个固定的区域。Chrétien L 用 *Lasius niger* 蚂蚁做了蚁群构造墓地的实验^[16]；Deneubourg J L 等也用 *Pheidole pallidula* 蚂蚁做了类似的实验^[17]。实验证实某些种类的蚁群的确能够构造蚁穴中的墓地，并将分散在蚁穴内各处的蚂蚁尸体堆积起来。

另外，观察还发现，蚁群在安排不同蚁卵的位置时，会按照蚁卵大小不同而分别将其堆放在蚁穴周围和中央的位置，我们可把蚁群的这种行为同构造墓地行为一起称之为蚁群的聚类行为。图 1.4 是真实蚁群聚类行为的实验结果，四张照片分别是实验初始状态、3 小时、6 小时和 36 小时的真实蚁群聚类情况。

Deneubourg J L 等进而提出了一种解释蚁群聚类现象的基本模型，这种模型主要是基于对单只蚂蚁“拾起”、“放下”物体的行为方式进行建模。一只随机移动的无负载蚂蚁在遇到一个物体时，如果该物体周围与之相同的物体越少，则“拾起”该物体的概率越大；反之，则“放下”该物体的概率越大。这样可以保

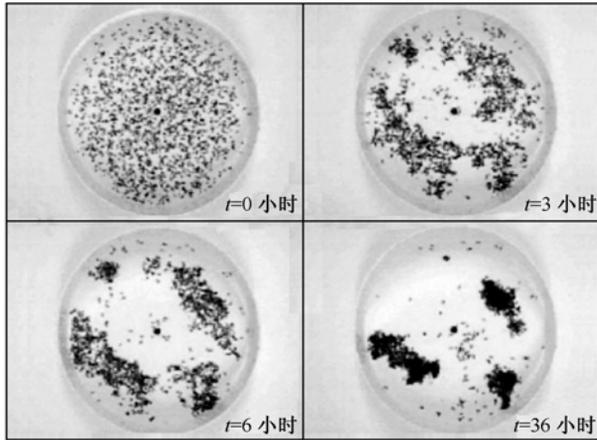


图 1.4 真实蚁群的聚类行为

证不破坏大堆的物体，并且能够收集小堆的物体。假设环境中只有一种类型的物体，则可定义由一只随机移动的无负载蚂蚁“拾起”一个物体的概率为

$$p_p = \left[\frac{k_1}{k_1 + f} \right]^2 \quad (1.2.3)$$

式中， f 表示蚂蚁附近的物体观察因子，反映了蚂蚁附近同类物体的个数， k_1 是阈值常数，若 $k_1 \gg f$ ，则 p_p 接近于 1（即当周围没有多少对象时，“拾起”一个物体的概率很大）；若 $k_1 \ll f$ ，则 p_p 接近于 0（即在一个稠密的聚类中，一个物体被移动的概率很小）。一只随机移动的有负载蚂蚁“放下”一个物体的概率为

$$p_d = \left[\frac{f}{k_2 + f} \right]^2 \quad (1.2.4)$$

式中， k_2 是不同于 k_1 的阈值常数，且当 $k_2 \gg f$ ，则 p_p 接近于 1；而当 $k_2 \ll f$ ，则 p_p 接近于 0。由此，蚂蚁的“拾起”和“放下”行为大致遵守相反的规则。

蚂蚁群体能以惊人的效率来有效地完成优化和控制的复杂任务，这不仅引起了生物学家和昆虫学家的极大兴趣。而且近些年也激发了计算机学家和系统优化学家的研究兴趣。他们发现通过对蚂蚁群体行为的深入研究可以引导他们从一个完全未知的领域来发展一些新型的、分布式的多智能体仿生算法。Dorigo M 等^[1, 2]由蚂蚁群体的“寻找食物”行为得到启发而提出了蚁群优化模型；Bonabeau E 等^[18]由蚂蚁群体的“任务分配”行为受到启发而提出了简单阈值模型；Deneubourg J L 等^[17]由蚂蚁群体的“构造墓地”行为得到启发而提出了仿生制造模型。

模拟蚁群“寻找食物”、“任务分配”和“构造墓地”三种群体行为而诞生的“蚁群优化”、“简单阈值”及“仿生制造”三种蚁群模型的系统学特征可通过表

1.1 进行对比说明。

表 1.1 不同蚁群模型的系统特征比较

系 统	真实蚁群	蚁群优化模型	简单阈值模型	仿生制造模型
元素	蚂蚁个体行为	单个人工蚂蚁求解	个体完成任务	单元体拾取与堆积
结构	个体相互影响	通过轨迹间接影响	激励与阈值的关系	空间单元体分布情况
系统环境	自然界	待求解的优化问题	任务分配问题	数据分析问题
行为和功能	群体行为	自组织优化求解	自组织任务分配	自组织数据分析
系统的演化	生存、繁衍	朝最优解方向前进	动态任务分配	完成数据分析

1.3 蚁群算法的思想起源

根据蚂蚁“寻找食物”的群体行为，意大利学者 Dorigo M 等^[1]于 1991 年在法国巴黎召开的第一届欧洲人工生命会议 (European Conference on Artificial Life, ECAL) 上最早提出了蚁群算法的基本模型；1992 年，Dorigo M 又在其博士学位论文中进一步阐述了蚁群算法的核心思想^[2]。

1.3.1 人工蚂蚁与真实蚂蚁的异同比较

1.3.1.1 相同点比较

蚁群算法是从自然界中真实蚂蚁觅食的群体行为得到启发而提出的，其很多观点都来源于真实蚁群^[11]，因此算法中所定义的人工蚂蚁与真实蚂蚁存在如下共同点。

1. 都存在一个群体中个体相互交流通信的机制

人工蚂蚁和真实蚂蚁都存在一种改变当前所处环境的机制：真实蚂蚁在经过的路径上留下信息素，人工蚂蚁改变在其所经路径上存储的数字信息，该信息就是算法中所定义的信息量，它记录了蚂蚁当前解和历史解的性能状态，而且可被其他后继人工蚂蚁读写。蚁群的这种交流方式改变了当前蚂蚁所经路径周围的环境，同时也以函数的形式改变了整个蚁群所存储的历史信息。通常，在蚁群算法中有一个挥发机制，它像真实的信息量挥发一样随着时间的推移来改变路径上的信息量。挥发机制使得人工蚂蚁和真实蚂蚁可以逐渐地忘却历史遗留信息，这样可使蚂蚁在选择路径时不局限于以前蚂蚁所存留的“经验”。

2. 都要完成一个相同的任务

人工蚂蚁和真实蚂蚁都要完成一个相同的任务，即寻找一条从源节点(巢穴)到目的节点(食物源)的最短路径。人工蚂蚁和真实蚂蚁都不具有跳跃性，只能在相邻节点之间一步步移动，直至遍历完所有城市。为了能在多次寻路过程中找到最短路径，则应该记录当前的移动序列。

3. 利用当前信息进行路径选择的随机选择策略

人工蚂蚁和真实蚂蚁从某一节点到下一节点的移动都是利用概率选择策略实现的，概率选择策略只利用当前的信息去预测未来的情况，而不能利用未来的信息。因此，人工蚂蚁和真实蚂蚁所使用的选择策略在时间和空间上都是局部的。

1.3.1.2 不同点比较

在从真实蚁群行为获得启发而构造蚁群算法的过程中，人工蚂蚁还具备了真实蚂蚁所不具有的一些特性：

(1) 人工蚂蚁存在于一个离散的空间中，它们的移动是从一个状态到另一个状态的转换；

(2) 人工蚂蚁具有一个记忆其本身过去行为的内在状态；

(3) 人工蚂蚁存在于一个与时间无关联的环境之中；

(4) 人工蚂蚁不是完全盲从的，它还受到问题空间特征的启发。例如有的问题中人工蚂蚁在产生一个解后改变信息量，而有的问题中人工蚂蚁每作出一步选择就更改变信息量，但无论哪种方法，信息量的更新并不是随时都可进行的；

(5) 为了改善算法的优化效率，人工蚂蚁可增加一些性能，如预测未来、局部优化、回退等，这些行为在真实蚂蚁中是不存在的。在很多具体应用中，人工蚂蚁可在局部优化过程中相互交换信息，还有一些改进蚁群算法中的人工蚂蚁可实现简单预测。

1.3.2 蚁群算法模型的建立

1.3.2.1 对蚂蚁个体的抽象

由于蚁群算法是对自然界中真实蚂蚁觅食行为的一种模拟，是一种机理上的应用，因此首先必须对真实蚂蚁进行抽象，而不可能也没必要对蚂蚁个体进行完全再现^[19]。抽象的目的就是为了能够更加有效地刻画出真实蚁群中能够为算法所借鉴的机理，同时摒弃与建立算法模型无关的因素。这样抽象出来的人工蚂蚁

可以看做是一个简单的智能体，能够完成所求问题简单解的构造过程，也能通过一种通信手段相互影响。

1.3.2.2 问题空间的描述

自然界中的真实蚂蚁存在于一个三维的环境中，而问题空间的求解一般是在平面内进行的，因此需要将蚂蚁觅食的三维空间抽象为一个平面。这一点比较容易理解，因为蚂蚁觅食所走的路径本来就存在于一个二维空间(平面或者曲面)上。另外一个问题是真实蚂蚁是在一个连续的二维平面中行走的，而我们无法用计算机直接来完整的描述一个连续的平面，因为计算机处理的是离散事件，因此必须将连续的平面离散化由一组点组成的离散平面，人工蚂蚁可在抽象出来的点上自由运动。这个抽象过程的可行性在于，尽管蚂蚁是在连续平面行动，但其行动经过的总是离散点，因此抽象过程只是提高了平面点离散分布的粒度，与其觅食行为的本身机理没有任何冲突。

基于上述分析，很容易得到蚁群算法所求解的问题空间可用一个重要的数学工具——图(graph)来描述。在工程实际中的很多问题都可以用图来描述，这便使蚁群算法的广泛应用成为可能。

1.3.2.3 寻找路径的抽象

真实蚂蚁在觅食过程中主要按照所处环境中的信息量来决定其前进的方向，而人工蚂蚁是在平面的节点上运动的，因此可把觅食过程抽象成算法中解的构造过程，将信息素抽象为存在于图的边上的轨迹。在每一节点，人工蚂蚁感知连接该节点与相邻节点边上的信息素轨迹浓度，并根据该浓度大小决定走向下一节点的概率。用任意两个节点分别表示蚂蚁的巢穴(初始节点)和食物源(目标节点)，人工蚂蚁从初始节点按照一定状态转移概率选择下一节点，依此类推，最终选择行走走到目标节点，这样便得到了所求问题的一个可行解。

1.3.2.4 信息素挥发的抽象

自然界中的真实蚂蚁总是在所经路径上连续不断地留下信息素，而信息素也会随着时间的推移而连续不断地挥发。由于计算机处理的事件只能是离散事件，所以必须使信息素的挥发离散发生。通常的做法是，当蚂蚁完成从某一节点到下一节点的移动后，即经过一个时间单位之后，进行一次信息素的挥发，而这种在离散时间点进行信息素挥发的方式与蚂蚁觅食过程的机理是完全相符的。

1.3.2.5 启发因子的引入

以上几点是对真实蚂蚁觅食行为的抽象，整个过程体现了蚁群算法的自组织性，但是这种自组织系统存在一个缺陷，即系统的演化需要耗费较长的时间。而实际应用时对算法运行时间的要求也是必不可少的，因此在决定蚂蚁行走方向的状态转移概率时，引入了一个随机搜索的过程，即引入了启发因子，根据所求问题空间的具体特征，给蚁群算法一个初始的引导，这个过程极大地增加了算法的时间有效性，从而使蚁群算法的有效应用成为可能。

不难看出，通过上述描述的一些抽象过程，可建立一个蚁群算法的基本模型。其问题空间是用图来描述的，解的获取是构造性的，而且在解的构造过程中人工蚂蚁没有接受任何全局的指导信息，因而求解过程是自组织的。在定义了一些规则之后，人工蚂蚁就可求解那些可用图来描述的问题。

在蚁群算法中，蚂蚁个体是蚁群算法的基本单元。蚂蚁个体所拥有的知识来源于与其他蚂蚁个体的通讯以及对周围环境的感知，因此，蚂蚁个体的知识积累是一个动态的过程。蚂蚁个体通过随机决策机制和相互协调机制可自适应地作出并完成自身评价，蚂蚁个体之间的这种分布性和协作性正是蚁群算法所研究的核心内容。

蚁群算法具有很强的自学习能力，可根据环境的改变和过去的行为结果对自身的知识库或自身的组织结构进行再组织，从而实现算法求解能力的进化，而这种进化是环境变化与算法自学习能力交互作用的产物，同时算法机理的复杂性和环境变化的不确定性进一步增加了蚁群算法的不可预测性。

1.4 蚁群算法的研究进展

自 1991 年意大利学者 Dorigo M 等^[1, 2]提出蚁群算法后的近 5 年时间里，并没有在国际学术界引起广泛关注，自然这段时期在蚁群算法理论及其应用上也并没有取得突破性进展。到了 1996 年，Dorigo M 等在《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B》上发表了“Ant system: optimization by a colony of cooperating agents”一文^[3]，在这篇文章中，Dorigo M 等不仅更加系统地阐述了蚁群算法的基本原理和数学模型，还将其与遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、爬山法等进行了仿真实验比较，并把单纯地解决对称 TSP 拓展到解决非对称 TSP、指派问题 (quadratic assignment problem, QAP) 以及车间作业调度问题 (job-shop scheduling problem, JSP)，且对蚁群算法中初始化参数对其性能的影响做了初步探讨，这是蚁群算法发展史上的又一篇奠基性文章。从目前公开发表的蚁群算法相关论文来看，其中 70% 以上的论文将这篇文

章或 1991 年 Dorigo M 等在 ECAL 上发表的“Distributed optimization by ant colonies”一文列为参考文献。自 1996 年之后的 5 年时间里，蚁群算法逐渐引起了世界许多国家研究者的关注，其应用领域得到了迅速拓宽，这期间也有大量有价值的研究成果陆续发表。

对蚁群算法不断高涨的研究热情导致了 1998 年 10 月 15 日至 10 月 16 日在比利时布鲁塞尔召开了第一届蚁群算法国际研讨会 (ANTS' 98)，会议由创始人 Dorigo M 负责组织。第一届就吸引了来自世界各地的 50 多位蚁群算法研究者，随后每隔两年都要在布鲁塞尔召开一次蚁群算法国际研讨会，历届会议的论文集均由著名的《Lecture Notes in Computer Science》(SCI Index) 结集出版。2000 年，Dorigo M 和 Bonabeau E 等^[20]在国际顶级学术刊物《Nature》上发表了蚁群算法的研究综述，从而把这一领域的研究推向了国际学术的最前沿。鉴于 Dorigo M 在蚁群算法研究领域的杰出贡献，2003 年 11 月欧盟委员会特别授予他“居里夫人杰出成就奖 (Marie Curie Excellence Award)”。

进入 21 世纪后的最近几年，国际著名的顶级学术刊物《Nature》曾多次对蚁群算法的研究成果进行报道^[20-22]，《Future Generation Computer Systems》(Vol. 16, No. 8) 和《IEEE Transactions on Evolutionary Computation》(Vol. 6, No. 4) 分别于 2000 年和 2002 年出版了蚁群算法特刊。如今，在国内外许多学术期刊和会议上，蚁群算法已经成为一个备受关注的研究热点和前沿性课题。

Gutjahr W J 于 1999 年撰写的技术报告^[23]和 2000 年发表的学术论文^[24]在蚁群算法发展史上有着特殊的作用，因为这两篇文章首次对蚁群算法的收敛性进行了证明。Gutjahr W J 将蚁群算法的行为简化为在一幅代表所求问题的有向图上的行走过程，进而从有向图论的角度对一种改进蚁群算法——图搜索蚂蚁系统 (graph-based ant system, GBAS) 的收敛性进行了理论分析，证明了在一些合理的假设条件下，他所提出的 GBAS 能以一定的概率收敛到所求问题的最优解。

我国在蚁群算法领域的研究起步较晚，从公开发表的论文（以投稿日期为标准）看，国内最先研究蚁群算法的是东北大学控制仿真研究中心的张纪会博士与徐心和教授（1997 年 10 月）^[25]。在国内众多的蚁群算法研究者中，值得一提的是当时年仅 17 岁的高二学生陈焯于 2001 年在《计算机工程》(Vol. 27, No. 12) 上发表了“带杂交算子的蚁群算法”一文^[26]，并基于 Visual Basic 开发了一个功能齐全、界面友好的“蚁群算法实验室”，引起了国内广大蚁群算法研究者的极大关注，正如《计算机工程》的“编者按”所言：“一个高中生能写出如此论文实属不易”。

回顾蚁群算法自创立以来十多年的发展历程，目前人们对蚁群算法的研究已由当初单一的 TSP 领域渗透到了多个应用领域。由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题，由离散域范围内研究逐渐拓展到了连续域范围内

研究，而且在蚁群算法的硬件实现上取得了突破性进展，同时在蚁群算法的模型改进及与其他仿生优化算法的融合方面也取得了相当丰富的研究成果，从而使这种新兴的仿生优化算法展现出前所未有的勃勃生机，并已经成为一种完全可与遗传算法相媲美的仿生优化算法。

蚁群算法在数学理论、算法改进、实际应用、硬件实现以及算法融合等方面的研究进展将在后续章节中进行详细介绍，这里不再赘述。表 1.2 列举了部分具有代表性的蚁群算法及其应用情况。

表 1.2 蚁群算法及其应用

问题名称	研究者	算法名称	年代	代表性文献
旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP)	Dorigo, Maniezzo and Colorni	AS	1991	[1, 2, 3, 27]
	Gambardella and Dorigo	Ant-Q	1995	[28]
	Dorigo and Gambardella	ACS; ACS-3-opt	1996	[29, 30, 31]
	Stützle and Hoos	MMAS	1997	[32, 33, 34]
	Bullnheimer, Hartl and Strauss	ASrank	1997	[35, 36]
	Cordón, <i>et al</i>	BWAS	2000	[37]
	Kaji T	ATSA	2001	[38]
指派问题 (quadratic assignment problem, QAP)	Maniezzo, Colorni and Dorigo	AS-QAP	1994	[39]
	Gambardella, Taillard and Dorigo	HAS-QAP	1997	[40, 41]
	Stützle and Hoos	MMAS-QAP	1997	[42, 43]
	Maniezzo	ANTS-QAP	1998	[44]
	Maniezzo and Colorni	AS-QAP	1999	[45]
调度问题 (scheduling problem)	Colorni, Dorigo and Maniezzo	AS-JSP	1994	[46]
	Stützle	AS-FSP	1997	[47]
	den Besten, Stützle and Dorigo	ACS-SMTWTP	1999	[48]
车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP)	Bullnheimer, Hartl and Strauss	AS-VRP	1997	[49, 50]
	Gambardella, Taillard and Agazzi	HAS-VRP	1999	[51]
有向连接网络路由 (connection-oriented network routing)	Schoonderwoerd, <i>et al</i>	ABC	1996	[52, 53]
	White, Pagurek and Oppacher	ASGA	1998	[54]
	Di Caro and Dorigo	AntNet-FS	1998	[55]
	Bonabeau, <i>et al</i>	ABC-smart ants	1998	[56]
无连接网络路由 (connection-less network routing)	Di Caro and Dorigo	AntNet	1997	[57, 58, 59]
	Subramanian, Druschel and Chen	Regular ants	1997	[60]
	Heusse, <i>et al</i>	CAF	1998	[61]
	van der Put and Rothkrantz	ABC-backward	1998	[62, 63]
序列排序问题 (sequential ordering problem, SOP)	Gambardella and Dorigo	HAS-SOP	1997	[64]
图形着色问题 (graph coloring problem, GCP)	Costa and Hertz	ANTCOL	1997	[65]
	Ahn S H	ANT_XRLF	2003	[66]

续表

问题名称	研究者	算法名称	年代	代表性文献
最短公共超串问题 (shortest common supersequence)	Michel and Middendorf	AS-SCS	1998	[67, 68]
频率分配问题 (frequency assignment problem, FAP)	Maniezzo and Carbonaro	ANTS-FAP	1998	[69, 70]
广义指派问题 (generalized assignment problem, GAP)	Ramalhinho Lourenco and Serra	MMAS-GAP	1998	[71]
多背包问题 (multiple knapsack problem, MKP)	Leguizamón and Michalewicz	AS-MKP	1999	[72]
	Parra-Hernandez R, Dimopoulos N	ACS-MKP	2003	[73]
光纤网络路由 (optical networks routing)	Navarro Varela and Sinclair	ACO-VWP	1999	[74]
冗余分配问题 (redundancy allocation problem, RAP)	Liang and Smith	AS-RAP	1999	[75]
	Liang and Smith	ACO-RAP	2004	[76]
单机排序 (machine scheduling)	Bauer, <i>et al</i>	ACS-MTTP	1999	[77]
故障识别 (fault identification)	Chang, <i>et al</i>	AS-FI	1999	[78]
	孙京浩, 李秋艳等	ACA-FI	2004	[79]
约束满足问题 (constraint satisfaction problem, CSP)	Schoofs and Naudts	AA-CSP	2000	[80]
	Solnon	ACO-CSP	2002	[81]
	Fu and Dozier	ASoHC	2003	[82]
	Mertens and Holvoet	CSAA-CSP	2004	[83]
连续函数优化 (continuous function optimization)	Mathur M, <i>et al</i>	ACO-CFO	2000	[84]
	魏平, 熊伟清	ACA-CFO	2001	[85]
全球定位系统 (global positioning system, GPS)	Camara and Loureiro Antonio	GPSAL	2000	[86]
	Saleh	ACS-GPS	2002	[87]
集合覆盖问题 (set covering problem, SCP)	de A Silva and Ramalho	AS-SCP	2001	[88]
系统辨识 (system identification)	Wang and Wu	ASA-SI	2001	[89]
	Abbaspour, <i>et al</i>	ACO-SI	2001	[90]
	汪镭, 吴启迪	ASA-SI	2003	[91]
	Duan, <i>et al</i>	ACA-SI	2004	[92]
机器人路径规划 (robot path planning)	金飞虎, 洪炳熔等	ACA-RPP	2002	[93]
数据挖掘 (data mining)	Parepinelli, <i>et al</i>	Ant-Miner-DM	2002	[94]
图像处理 (image processing)	Meshoul and Batouche	ACS-IP	2002	[95]
	Zheng, <i>et al</i>	HACA-IP	2003	[96]

续表

问题名称	研究者	算法名称	年代	代表性文献
武器目标分配问题 (weapon-target assignment problem, WTAP)	Lee, <i>et al</i>	ACO-WTAP	2002	[97]
二维格模型蛋白质折叠问题 (2D HP protein folding problem)	Shmygelska, <i>et al</i>	ACA-2DHPPFP	2002	[98]
地雷探测问题 (mine detection problem, MDP)	Kumar and Sahin	AC-MDP	2002	[99]
	Kumar and Sahin	AC-MDP	2003	[100]
	Chapman and Sahin	AA-MDP	2004	[101]
岩土工程 (geotechnical engineering)	陈昌富, 谢学斌 高玮, 郑颖人	HACA-GE	2002	[102]
		ACA-GE	2002	[103]
光谱解析 (spectra analyzing problem, SAP)	丁亚平, 苏庆德等	ACA-SAP	2002	[104, 105]
加权最小碰集问题 (weighted minimum hitting set problem, WMHSP)	Cincotti	AA-WMHSP	2003	[106]
最大独立集问题 (maximum independent set problem, MISP)	Li and Xu	ACO-MISP	2003	[107]
网格分割问题 (mesh partitioning problem, MPP)	Korosec, <i>et al</i>	ACA-MPP	2004	[108]
转台控制 (turntable control)	段海滨, 王道波等	IACA-TC	2004	[5, 109]
几何约束 (geometric constraint problem, GCP)	曹春红, 李文辉等	GAAA-GCP	2004	[110, 111]
圆排列问题 (circle permutation problem, CPP)	高尚, 杨静宇等	ACSAA-CPP	2004	[112]
点覆盖问题 (point covering problem, PCP)	Hua, <i>et al</i>	AA-PCP	2004	[113]
粗糙数据约简 (rough data reduction, RDR)	Jensen and Shen	ACO-RDR	2005	[114]

1.5 本书的体系结构

本书系统介绍了蚁群算法的理论、方法、应用及其工程实现，其逻辑结构是按照分析、深化、改进、应用、实现、融合的学术研究步骤安排的。全书共分10章，其内容（连同附录）基本构成了一个完整的封闭体系，本书的组织结构如图1.5所示。