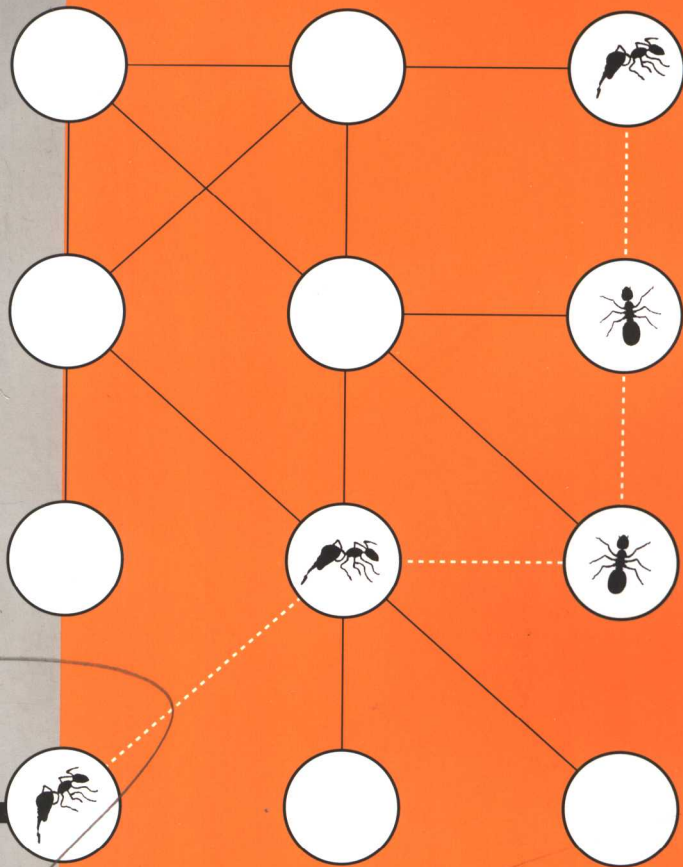


蚁群优化

(意) Marco Dorigo (德) Thomas Stützle 著
张军 胡晓敏 罗旭耀 等译

Ant
Colony
Optimization



清华大学出版社

0224

50

2007

Ant Colony Optimization

蚁群 优化



(意) Marco Dorigo (德) Thomas Stützle 著
张 军 胡晓敏 罗旭耀 陈伟能 谭 璇 译

清华大学出版社
北京

Ant Colony Optimization

Marco Dorigo and Thomas Stützle

Copyright © 2004 by The MIT Press

EISBN: 0-262-04219-3

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 MIT Press 授权清华大学出版社独家出版发行。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2005-6393

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

蚁群优化/(意)多里戈(Dorigo, M.), (德)施蒂茨勒(Stützle, T.)著; 张军等译. —北京: 清华大学出版社, 2007. 1

书名原文: Ant Colony Optimization

ISBN 978-7-302-13887-7

I. 蚁… II. ①多… ②施… ③张… III. 智能控制—算法 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 115273 号

责任编辑: 薛 慧

封面设计: 常雪影

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 王秀菊

出版发行: 清华大学出版社 **地 址:** 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> **邮 编:** 100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机: 010-62770175 **邮购热线:** 010-62786544

投稿咨询: 010-62772015 **客户服务:** 010-62776969

印 刷 者: 北京季蜂印刷有限公司

装 订 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170×230 **印 张:** 20 **字 数:** 332 千字

版 次: 2007 年 1 月第 1 版 **印 次:** 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 36.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 020473-01

译者序

蚁群优化是 Marco Dorigo 等学者在真实蚂蚁觅食行为的启发下提出的一种具高度创新性的元启发式算法。蚁群优化思想的萌芽至今才不过短短 15 年的时间,然而,这种新型的优化算法很快就得到了广泛的认可,对它的研究从欧洲的一个实验室传播到全球千千万万个实验室;它的应用从 TSP 问题扩展到优化问题领域的各个方面;它的算法设计得到了不断改进,并逐渐构筑起一套成熟的算法框架。目前,蚁群优化已经成为组合优化领域最具潜力的算法之一,也成为了众多学者的研究焦点。

Dorigo 是蚁群优化的创始人,Stützle 是对蚁群优化的算法与应用发展有重要贡献的学者。他们共同撰写了《蚁群优化》一书,从原理、算法描述、理论、应用、发展前景等各方面对蚁群优化作出了全面论述。我们相信,对于学术研究者来说,这本书能帮助您更深刻地理解蚁群优化,为学术研究提供新的思想源泉和研究方法;对于工程和应用研究者来说,这本书能为实际应用问题的求解提供全新的思路,为蚁群优化思想的应用提供指引;对于学生或优化算法爱好者来说,这本书将成为您打开蚁群优化之门的钥匙。

我们很幸运能够有机会翻译这本优秀的图书。一方面,在翻译这本书的过程中,我们可以仔细地体味蚁群优化的思想,加深对算法的理解;另一方面,我们也希望通过引进此书,能进一步普及蚁群优化在国内的研究和应用。

翻译工作的分工如下:张军博士负责全书的翻译和校对工作,胡晓敏翻译了前言、第 1 章、第 2 章和第 5 章的一部分,陈伟能翻译

了第3章、第5章的一部分以及索引,罗旭耀翻译了第4、6、7章,谭旋负责全书图表的翻译工作,中山大学中文系的陈淑环博士对中译文进行了修饰。参与本书翻译和校对工作的还有中国科学院计算所的黄强,以及中山大学的许志坚、李慧芬和钟竞辉。

最后,我们要感谢 Dorigo 教授在百忙之中悉心回答译者的问题,并特为中译本撰写了序言。

由于翻译时间仓促,译者水平有限,翻译不当或疏漏之处在所难免,希望广大读者批评指正。

张 军

2006年5月于中山大学

Preface to the Chinese Translation

“Ant Colony Optimization” was born some twenty years ago in one of the most prestigious Italian universities: Politecnico di Milano. At that time I was a doctoral student under the supervision of Alberto Colorni, a very open-minded professor of operations research. When I first proposed to try to design optimization algorithms inspired by the foraging behavior of ants, he was immediately enthusiastic. So was one of my friends of those times, Vittorio Maniezzo (now a professor of computer science at Università di Bologna, in Italy). Together, in 1991, we designed Ant System, the first Ant Colony Optimization (ACO) algorithm.

I think that, at that time, it would have been impossible to forecast the success this simple algorithm would have had. In less than 15 years, with the help of many researchers among which a particularly important role was played by Luca M. Gambardella and Thomas Stützle, it spread from a single Italian lab to thousands of labs everywhere in the world. The spreading followed a somehow nearest neighbor algorithm: First, ACO became well known in Europe, where the majority of ACO researchers still reside. Then, with the publication of the ACO book by MIT Press, it spread to the US and the rest of the world. However, language barriers have up to now made it more difficult than necessary the spreading of ACO in the most populous and fastest growing country of the world: China.

I therefore warmly welcome the translation and I am thankful to Prof. Jun Zhang for the incredible work done.

Brussels, May 7, 2006

Marco Dorigo

中文翻译版序言

Foreword

“蚁群优化”在 20 年前诞生于意大利的一所最负盛名的大学——米兰理工大学 (Politecnico di Milano)。那时候 Alberto Colomi 教授是我的博士生导师,他是一位在工程研究方面非常开明的教授。当我第一次提出利用蚂蚁的觅食行为来设计优化算法时,他非常热情地支持我。而我当时的一位朋友——Vittorio Maniezzo (现在是意大利博洛尼亚大学 (Università di Bologna) 计算机科学系的教授) 同样对这个想法很感兴趣。1991 年,我们一起设计了蚂蚁系统 (Ant System), 也就是第一个蚁群优化 (ACO) 算法。

当时我是无法预见到这种简单的算法可以获得如今这么大的成就的。过去的 15 年间,在很多研究者的帮助下,特别是 Luca M. Gambardella 和 Thomas Stützle, 这种算法从意大利的一个实验室传播到了世界上千千万万个实验室中。这种传播模式类似于最近邻算法: 首先,ACO 在欧洲——这个大部分 ACO 的研究者居住的地方传播开来。然后,随着 ACO 这本书在 MIT 出版社的出版,这个算法传播到了美国以及世界的其他地方。然而,语言上的障碍使得到目前为止,ACO 算法在世界上人口最多、发展最快的国家——中国的传播还遇到不少困难。

因此,我非常高兴中文翻译版的面市,也非常感谢张军教授对这本书所做出的大量工作。

Marco Dorigo

布鲁塞尔, 2006 年 5 月 7 日

前言

Preface

蚂蚁所表现出来的复杂群体行为一直为人类所关注,其中最引人瞩目的莫过于所谓的蚂蚁街道的形成。在孩提时代,或许我们曾为了观察蚂蚁对干扰的反应而特意在它们的“高速公路”上踩踏或设置障碍物,或许曾好奇这些路究竟从何而来,又将通向何方。对于大部分人来说,这些问题在他们长大成人以后远不如进入高等学校学习计算机科学和高等数学来得重要。然而,还有相当多的研究者,主要是生物学家,仍在仔细地研究蚂蚁的行为。

令人惊讶的是,某些种类的蚂蚁所表现出来的路径寻找行为模式非常不可思议,这个模式就是计算机科学家平常所说的最短路径搜索。生物学家在实验中发现,蚂蚁可以通过感知和释放一种带有气味的化学物质——信息素来实现相互之间的通信交流。在求解优化问题的时候,正是蚂蚁这种特有的行为模式启发了计算机科学家建立新型算法的灵感。关于这类算法的第一次尝试出现在 20 世纪 90 年代初期,尽管那时的算法在今天看来非常幼稚,但重要的是它表明了此类算法是可行的。从那以后,关于这类算法以及其他类似思想方法的研究和成果不断涌现,而蚁群优化(ant colony optimization, ACO)正是众多成果之一。事实上,基于蚂蚁行为的 ACO 是最成功且受到最广泛认可的算法技术。ACO 的成功不仅体现在能够求解众多不同类型的优化问题,而且更多体现在它在求解大量问题时所能获得的极佳性能。

全书纵览

本书介绍了蚁群优化这一飞速发展的领域里许多可行的 ACO 算法及其主要应用。全面详细地描述了 ACO 思想及其在各种组合优化问题上的应用等。本书分为七章,各章内容如下:

第 1 章解释了蚂蚁如何在受控实验条件下找出最短路径,并阐述了此种行为转换到优化算法的具体过程。

第 2 章介绍了 ACO 元启发式算法,并分析讨论了该算法在组合优化中应用的情况和问题。此外,本章还提出了 NP-难等复杂性理论的基本概念,并简单论述了其他主要的元启发式算法。

第 3 章深入描述了当前学术界所有可用的主流 ACO 算法。本章以旅行商问题作为应用例子说明算法的实现过程。有关算法的一个 C 语言基本实现的简要说明及可用的公共软件可在 www.aco-metaheuristic.org/aco-code/ 中找到。

第 4 章讲述了当前已知的有关 ACO 算法的理论知识。本章证明了某些类型的 ACO 算法的收敛性,讨论了 ACO 与其他方法之间的关系,例如随机梯度下降、交互信息最大化输入聚类 and 交叉熵。

第 5 章综述了当前开发 ACO 用以解决一系列组合优化问题的现状。涉及的应用实例,除了包括路由、分配、调度和子集问题以外,还包括其他不同领域中的若干问题,例如机器学习和生物信息学。此外,本章还谈到了在使用算法的过程中遇到新问题时所要遵循的“使用原则”。

第 6 章重点描述了 AntNet 的详细内容。AntNet 是一种用以解决网络路由问题的 ACO 算法,所谓网络路由问题是指分组交换通信网络中路由表的建立和维护问题。

第 7 章总结了所讨论领域中的主要成果,并描绘了未来研究中一些有趣的发展方向。

本书每一章(除了最后一章)的最后都包含以下三个小节:书目评注、需要牢记的知识点和思考与计算习题。

- “书目评注”是一种带短评的目录索引,包含了与当前章节中讨论话题有关的进一步的文献索引。
- 在“需要牢记的知识点”中,列举了当前章节的重要知识点。

- “思考与计算习题”中包括思考习题和计算习题,具体采取哪种形式的习题与当前章节给出的材料有关。

本书的最后还列出了有关 ACO 算法的参考文献,其中包含了许多更深入的相关文献。

总体而言,本书适合任何具有大学水平和科研背景的人员阅读。对于熟悉有关图论、编程和概率的读者来说,本书所使用的元启发式算法除了第 4 章需要一些较为深入的概率理论知识以外,其余都是相当通俗的。本书面向的主要对象有:①从事运筹学、人工智能和计算智能等相关研究的科研人员和工程技术人员;②有志于研究如何把 ACO 算法应用于解决组合优化问题的练习者;③计算机科学、管理科学、运筹学和人工智能等专业的研究生和本科高年级学生。

鸣 谢

Acknowledgments

许多人对蚁群优化领域的发展及其成功做出了巨大的贡献,并不断塑造着我们目前所能看到的蚁群优化。

首先,我们特别感谢 Alberto Colorni 和 Vittorio Maniezzo 对蚁群算法做出的贡献。Alberto 和 Vittorio 与当时还是意大利米兰理工大学(Politecnico di Milano)博士生的 Marco Dorigo 紧密协作,定义了首个 ACO 算法。没有他们所做的贡献,可能就不会存在本书所介绍的 ACO 研究。此外,我们还要感谢 Jean-Louis Deneubourg 和 Luca Maria Gambardella。Jean-Louis,一位昆虫社会学领域公认的专家,他触发了 ACO 研究的思想灵感。Luca,一个富有实用精神的计算机科学家,在把 ACO 从一个玩具式的东西转化为具有竞争性的元启发式算法的过程中,他是最得力的帮手。

另外,在此还要感谢许多发表过有关 ACO 文章的研究者(关于应用、理论结果等)。本书在写作阶段深受他们的研究和实验结果的启发,这在第 5 章中可以看到。

特别感谢我们的同事和学生,他们检查了本书大部分章节的内容。我们还非常感谢 Maria Blesa, Christian Blum, Julia Handl, Elena Marchiori, Martin Middendorf, Michael Samples 和 Tommaso Schiavinotto,他们对本书提出了很多很好的意见。此外,我们要感谢帮助审阅本书的同事: Mauro Birattari, Roberto Cordone, Gianni Di Caro, Karl Dörner, Alex Freitas, Luca Maria Gambardella, Jose Antonio Gámez, Walther Gutjahr, Richard Hartl, Holger Hoos, Joshua Knowles, Guillermo Leguizamón, John Levine, Helena

Lourenço, Max Manfrin, Vittorio Maniezzo, Daniel Merkle, José Miguel Puerta, Marc Reimann, Andrea Roli, Alena Shmygelska, Krzysztof Socha, Christine Solnon 和 Mark Zlochín。我们还特别感谢提供了图 1.7 和图 3.2 中的蚂蚁图片的 Cristina Versino。感谢所有在 IRIDIA 与智能小组中的有关人员,他们为我们提供了一个适合进行科学与智能模拟的工作环境。

我们要感谢 MIT 出版社的工作人员,特别是 Robert Prior,他们对本书的成功出版做出了很大的贡献。尤其是 Bob,他每次都友善地敦促我们写好本书的稿子。

最后要感谢我们的家庭,特别是我们的妻子 Laura 和 Maria José,她们一直都在为本书的完成提供舒适的写作环境,感谢我们的孩子 Luca, Alessandro 和 Alexander,他们使我们的生活变得更加有意义。

作为比利时国家科学研究基金会(FNRS)的高级研究助理,Marco Dorigo 特别感谢 FNRS 的支持。同时我们还要感谢多年来资助两位作者的众多机构:意大利的米兰理工大学,美国加州的伯克利国际计算机科学学院,瑞士卢加诺(Lugano)的人工智能研究所(IDSIA),德国达姆施塔特工业大学(Darmstadt University of Technology)的智能研究小组,比利时布鲁塞尔自由大学(Université Libre de Bruxelles)的 IRIDIA 小组,以及 CEC 的改进人类潜能计划,他们从批准 HPRN-CT-1999-00106 项目开始到称为“元启发式网络”的研究训练网络的建立,一直都在支持我们。本书的两位作者对本书的内容负有全部责任,而且本书并不反映任何组织的意见。同时任何组织都无权使用本书中出现的数据。

目 录

Contents

1 从真实蚂蚁到人工蚂蚁	1
1.1 蚂蚁的觅食行为及其优化过程	2
1.1.1 双桥实验	2
1.1.2 随机模型	6
1.2 向人工蚂蚁转换	7
1.3 人工蚂蚁和最小成本路径	10
1.3.1 S-ACO	12
1.3.2 有关 S-ACO 的实验	15
1.4 书目评注	21
1.5 需要牢记的知识点	21
1.6 思考与计算习题	22
2 蚁群优化元启发式算法	24
2.1 组合优化	25
2.1.1 计算复杂度	26
2.1.2 NP-难问题的解决方法	28
2.1.3 什么是元启发式算法	32
2.2 ACO 元启发式算法	33
2.2.1 问题描述	33
2.2.2 蚂蚁的行为	35
2.2.3 元启发式算法	36

2.3	如何应用 ACO	39
2.3.1	旅行商问题	40
2.3.2	顺序排列问题	41
2.3.3	广义分配问题	41
2.3.4	多重背包问题	43
2.3.5	网络路由问题	44
2.3.6	动态旅行商问题	45
2.4	其他元启发式算法	45
2.4.1	模拟退火	47
2.4.2	禁忌搜索	48
2.4.3	导向性局部搜索	50
2.4.4	迭代局部搜索	52
2.4.5	贪婪随机自适应搜索过程	53
2.4.6	进化计算	54
2.4.7	分散搜索	56
2.5	书目评注	58
2.6	需要牢记的知识点	60
2.7	思考与计算习题	61
3	旅行商问题中的蚁群优化算法	63
3.1	旅行商问题	64
3.2	TSP 中的 ACO 算法	65
3.3	蚂蚁系统及其直接后续算法	68
3.3.1	蚂蚁系统	68
3.3.2	精华蚂蚁系统	71
3.3.3	基于排列的蚂蚁系统	72
3.3.4	最大最小蚂蚁系统	73
3.4	蚂蚁系统的扩展	75
3.4.1	蚁群系统	75
3.4.2	近似非确定性树搜索	78
3.4.3	ACO 的超立方体框架	79
3.5	并行执行	81

3.6	实验测评	82
3.6.1	ACO 算法的行为	83
3.6.2	蚂蚁系统与它的扩展算法的比较	89
3.7	添加局部搜索的 ACO	90
3.7.1	如何在 ACO 算法中加入局部搜索	91
3.8	ACO 算法的实现	98
3.8.1	数据结构	98
3.8.2	算法	102
3.8.3	实现其他 ACO 算法时的修改	109
3.9	书目评注	111
3.10	需要牢记的知识点	114
3.11	思考与计算习题	115
4	蚁群优化理论	117
4.1	ACO 的理论思考	118
4.2	问题和算法	119
4.3	收敛性证明	123
4.3.1	值收敛	124
4.3.2	解收敛	126
4.3.3	ACO 算法的附加特性	129
4.3.4	证明实际上说明了什么问题	130
4.3.5	一些 ACO 算法的收敛性	131
4.4	ACO 与基于模型的搜索	133
4.4.1	基于模型的搜索	133
4.4.2	MBS 框架中的 SGA 和 CE	135
4.4.3	ACO, SGA 和 CE	139
4.5	书目评注	143
4.6	需要牢记的知识点	144
4.7	思考与计算习题	145
5	NP-难问题的蚁群优化	146
5.1	路由问题	147

5.1.1	顺序排列	147
5.1.2	车辆路由	149
5.2	分配问题	153
5.2.1	二次分配	154
5.2.2	广义分配问题	157
5.2.3	频率分配	159
5.2.4	其他针对分配问题的 ACO 应用	160
5.3	调度问题	161
5.3.1	单机器总权重延迟调度	162
5.3.2	工序车间、开放车间和组车间调度	166
5.3.3	资源约束项目调度	171
5.3.4	其他针对调度问题的 ACO 应用	174
5.4	子集问题	175
5.4.1	集合覆盖	175
5.4.2	带权约束的图树分割问题	177
5.4.3	边带权 t -基树问题	179
5.4.4	针对其他子集问题的 ACO 应用	181
5.5	对其他 NP-难问题的 ACO 应用	183
5.5.1	最短公共超序列问题	183
5.5.2	箱子包装	187
5.5.3	2D-HP 蛋白质折叠	190
5.5.4	带约束满足	193
5.6	机器学习问题	196
5.6.1	分类规则的学习	197
5.6.2	贝叶斯网络结构的学习	200
5.6.3	其他针对机器学习问题的 ACO 应用	202
5.7	ACO 的使用原则	202
5.7.1	构建图	203
5.7.2	信息素的定义	204
5.7.3	探索与开发的平衡	205
5.7.4	启发式信息	206
5.7.5	ACO 算法和局部搜索	207

5.7.6	蚂蚁的数目	208
5.7.7	候选列表	209
5.7.8	使用 ACO 算法求解问题的步骤	209
5.8	书目评注	210
5.9	需要牢记的知识点	212
5.10	思考与计算习题	213
6	AntNet: 数据网络路由中的 ACO 算法	215
6.1	路由问题	216
6.1.1	路由算法的广义分类	216
6.1.2	通信网络模型	218
6.2	AntNet 算法	220
6.2.1	AntNet: 数据结构	221
6.2.2	AntNet: 算法	222
6.2.3	如何评价一个蚂蚁旅程的优劣	228
6.3	实验设置	229
6.3.1	网络的拓扑结构和物理特性	229
6.3.2	流量模式	230
6.3.3	性能评价的标准	232
6.3.4	具有竞争力的路由算法及其参数	232
6.4	实验结果	234
6.4.1	NSFnet	235
6.4.2	NTTnet	238
6.4.3	路由开销	240
6.5	AntNet 与媒介质	242
6.6	AntNet、蒙特卡罗仿真和强化学习	244
6.6.1	AntNet 作为带有偏向探索的蒙特卡罗在线系统	244
6.6.2	AntNet 与强化学习	245
6.7	书目评注	246
6.8	需要牢记的知识点	248
6.9	思考与计算习题	248