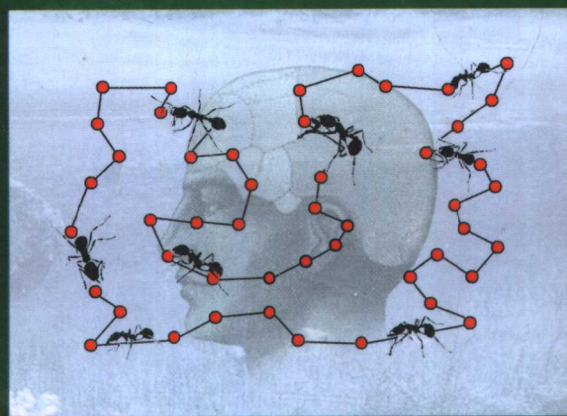


蚁群算法及其应用

ANT COLONY ALGORITHMS WITH APPLICATIONS

李士勇 等编著



哈尔滨工业大学出版社

蚁群算法及其应用

李士勇 陈永强 李 研 编著

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

内 容 提 要

蚁群算法是意大利学者 Dorigo 等人于 1991 年创立的,是继神经网络、遗传算法、免疫算法之后的又一种新兴的启发式搜索算法。蚂蚁群体是一种社会性昆虫,它们有组织、有分工,还有通讯系统,它们相互协作,能完成从蚁穴到食物源寻找最短路径的复杂任务。模拟蚂蚁群体智能的人工蚁群算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特点,不仅在求解组合优化问题中获得广泛应用,而且也用于连续时间系统的优化。

本书是国内首部蚁群算法的专著,系统地阐述蚁群算法的基本原理、基本蚁群算法及改进算法,蚁群算法与遗传、免疫算法的融合,自适应蚁群算法,并行蚁群算法,蚁群算法的收敛性与理论模型及其在优化问题中的应用。

本书可供人工智能、计算机科学、信息科学、控制工程、管理工程、交通工程、网络工程、智能优化算法及智能自动化等领域的广大师生和科技人员学习及参考。

图书在版编目(CIP)数据

蚁群算法及其应用/李士勇等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.9

ISBN 7-5603-2058-9

I. 蚁… II. 李… III. 智能控制-算法 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 071632 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 16 字数 330 千字

版 次 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-2058-9/TP·204

印 数 1~5 000

定 价 25.00 元

前言

回想起刚刚过去的 20 世纪后半叶的 50 年,科学技术经历了人类历史上惊人的飞速发展,其中发展最快的两个门类要数计算机科学与自动化科学,它们又同属于信息科学类。

21 世纪被人们誉为信息时代、知识经济时代、生物科技时代……无论如何称誉都绝不能不突出信息技术、信息化的重要地位。当今的信息技术发展主要特征是数字化、网络化、智能化。数字化可以认为是信息的表达形式特征,网络化可以认为是信息传输的结构形式特征,而智能化则可以理解为对信息处理的本质特征。正因为如此,在 IFAC 第 14 届国际自控联大会上,我国著名科学家宋键院士的大会报告称:“21 世纪——智能自动化时代”。

智能化可以认为是智能自动化的简称,利用计算机实现对信息处理的智能化,是信息时代的重要标志。那么“智能”从何而来?只能从模拟人的智能而来,从模拟大脑的模糊逻辑思维建立了模糊逻辑,模拟大脑神经系统建立了人工神经网络;从模拟人类进化过程建立了遗传算法,模拟人工免疫系统建立了人工免疫算法等。这些算法都具有模拟智能及优化的特点,因此,将这种通过软件计算形式的模拟智能又称为计算智能,或称智能计算、智能优化算法。

众所周知,除了人类社会以外,还有许多社会性昆虫,如蚂蚁、蜜蜂等,它们个体虽然很简单,但却表现出高度结构化的社会组织,作为这种组织的结果表现出它们构成的群体能完成远超越其个体能力的复杂任务。蚂蚁之所以被称为社会性昆虫,是因为它们具备了组成社会的三要素:除有组织、有分工外,还有相互通讯和信息的传递。研究表明,蚁群有着奇妙的信息系统。生物学家和仿生学家观察研究发现,蚂蚁在觅食走过的路径上释放一种特有的分泌物——信息素(Pheromone),蚂蚁个体之间正是通过这种信息素传递信息,从而相互协作,完成从蚁穴到食物源寻找最短路径的复杂任务。

从蚂蚁群体寻找最短路径觅食行为受到启发,意大利学者 Dorigo 等人 1991 年提出了一种模拟自然界蚁群行为的模拟进化算法——人工蚁群算法,简称蚁群算法。这种算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特征,本

质上是进化算法中的一种新型启发式优化算法。蚁群算法虽然是从研究求解旅行商问题(TSP)提出的,但它在求解多种组合优化问题中获得了广泛的应用,如调度、二次分配、网络路由等。它不仅用于离散系统的优化,而且也用于连续时间系统的优化。

根据蚁群算法创立者 Dorigo 等人的研究实验结果表明,蚁群算法在求解节点数为 5~100 的组合优化问题上,选用合适的参数,其优化结果普遍好于遗传算法(GA)、进化算法(EP)和模拟退火算法(SA)。因此,目前国内外有许多学者开展了蚁群算法的研究和应用工作,但普遍感到缺乏系统而深入地介绍蚁群算法及其应用的书籍。为了推动这一领域研究工作的发展,我们编写了本书,以起到抛砖引玉的作用。

本书共 10 章,内容可分为四个部分:第 1 部分阐述了基本的蚁群算法;第 2 部分介绍对基本蚁群算法的改进算法;第 3 部分论述蚁群算法收敛性与蚁群行为模型,属于理论部分;第 4 部分介绍蚁群算法在多个领域的应用。

本书由李士勇教授任主编,其中第 1~5 章由陈永强和李士勇共同编写,第 6~10 章由李士勇和李研共同编写。此外,参加编写和提供素材的还有赵宝江、袁丽英、祁荣宾、詹欣和魏治安。在本书的编写过程中,作者力求反映国内外在这一领域的最新成果,也包括作者的部分研究成果,书中部分内容引用了国内外一些专家、学者的研究成果,在此向他们表示诚挚的谢意!

由于时间紧迫,作者学识有限,因此难免存在不妥之处,诚请广大同行、读者及时给予指正。

作 者
2004 年 9 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 蚂蚁的基本习性	1
1.1.1 蚂蚁的信息系统	1
1.1.2 蚁群社会的遗传与进化	2
1.2 蚁群觅食行为与觅食策略	2
1.2.1 蚂蚁的觅食行为	2
1.2.2 蚂蚁的觅食策略	3
1.3 人工蚁群算法的基本思想	14
1.3.1 人工蚁与真实蚂蚁的异同	15
1.3.2 人工蚁群算法的实现过程	17
1.4 蚁群优化算法的意义及应用	18
1.4.1 蚁群优化算法的意义	18
1.4.2 蚁群算法的应用	19
1.5 蚁群算法的展望	21
第 2 章 蚂蚁系统——蚁群算法的原型	22
2.1 蚂蚁系统模型的建立	22
2.2 蚁量系统和蚁密系统的模型	24
2.3 蚁周系统模型	26
第 3 章 改进的蚁群优化算法	29
3.1 带精英策略的蚂蚁系统	29
3.2 基于优化排序的蚂蚁系统	30
3.3 蚁群系统	31
3.3.1 蚁群系统状态转移规则	32
3.3.2 蚁群系统全局更新规则	33
3.3.3 蚁群系统局部更新规则	33
3.3.4 候选集合策略	33
3.4 最大-最小蚂蚁系统	35
3.4.1 信息素轨迹更新	35
3.4.2 信息素轨迹的限制	36

3.4.3	信息素轨迹的初始化	37
3.4.4	信息素轨迹的平滑化	38
3.5	最优 - 最差蚂蚁系统	38
3.5.1	最优 - 最差蚂蚁系统的基本思想	38
3.5.2	最优 - 最差蚂蚁系统的工作过程	39
第 4 章	蚁群优化算法的仿真研究	41
4.1	蚂蚁系统三类模型的仿真研究	42
4.1.1	三类模型性能的比较	42
4.2.2	基于统计的参数优化	42
4.2	基于蚁群系统模型的仿真研究	46
4.2.1	局部优化算法的有效性	46
4.2.2	蚁群系统与其他启发算法的比较	47
4.3	最大 - 最小蚂蚁系统的仿真研究	48
4.3.1	信息素轨迹初始化研究	48
4.3.2	信息素轨迹量下限的作用	50
4.3.3	蚁群算法的对比	50
4.4	最优 - 最差蚂蚁系统的仿真研究	51
4.4.1	参数 ϵ 的设置	51
4.4.2	几种改进的蚁群算法比较	52
第 5 章	蚁群算法与遗传、模拟退火算法的对比	53
5.1	遗传算法	53
5.1.1	遗传算法与自然选择	53
5.1.2	遗传算法的基本步骤	54
5.1.3	旅行商问题的遗传算法实现	55
5.2	模拟退火算法	57
5.2.1	物理退火过程和 Metropolis 准则	57
5.2.2	模拟退火法的基本原理	58
5.3	蚁群算法与遗传算法、模拟退火算法的比较	59
5.3.1	三种算法的优化质量比较	59
5.3.2	三种算法收敛速度比较	59
5.3.3	三种算法的特点与比较分析	61
第 6 章	蚁群算法与遗传、免疫算法的融合	63
6.1	遗传算法与蚂蚁算法融合的 GAAA 算法	63
6.1.1	遗传算法与蚂蚁算法融合的基本思想	63

6.1.2	GAAA 算法中遗传算法的结构原理	63
6.1.3	GAAA 算法中蚂蚁算法的设计	64
6.1.4	GAAA 算法对 TSP 问题的仿真结果	65
6.2	同遗传算法整合的蚂蚁系统 ASGA	68
6.2.1	ASGA 系统	68
6.2.2	利用 ASGA 的寻径方法	70
6.2.3	寻径问题的 AS 解决方法	71
6.3	具有变异特征的蚁群算法	72
6.3.1	基本蚁群算法的分析	72
6.3.2	具有变异特征的蚁群算法	72
6.3.3	具有变异特征的蚁群算法实验结果	73
6.4	基于免疫的蚁群优化算法	75
6.4.1	蚁群优化算法	75
6.4.2	局部搜索和模拟退火算法	76
6.4.3	基于免疫的蚁群优化算法	78
6.4.4	在解决武器目标分配问题中的应用	81
第 7 章	自适应蚁群算法	84
7.1	基于调节信息素挥发度的自适应蚁群算法	84
7.1.1	基本蚁群系统模型	84
7.1.2	一种自适应蚁群算法	85
7.1.3	对 TSP 问题的仿真结果	86
7.2	具有分工的自适应蚁群算法	87
7.2.1	基本蚁群算法模型	88
7.2.2	对基本蚁群算法的改进策略	89
7.2.3	蚁群中的工作分工	90
7.2.4	在组合优化及函数优化问题中的应用	93
7.3	基于协同学习机制的蚁群算法	96
7.3.1	基于协同学习的蚁群系统算法	96
7.3.2	基于协同工作机制的增强蚁群算法	99
第 8 章	并行蚁群算法	105
8.1	并行算法的基本概念	105
8.1.1	并行计算机及其分类	105
8.1.2	并行算法的设计	105
8.1.3	并行算法的性能评价	106

8.2 蚁群算法的并行实现	107
8.2.1 蚁群搜索算法的原理	107
8.2.2 常用的并行策略	108
8.2.3 用于 TSP 问题的并行蚂蚁算法	110
8.2.4 结论	114
8.3 二次分配问题的并行蚁群算法	114
8.3.1 二次分配问题的蚁群算法	115
8.3.2 QAP 的蚁群算法步骤	115
8.3.3 并行蚁群模型	117
8.3.4 实验结果比较与结论	118
8.4 接线路径优化的蚁群并行算法	123
8.4.1 接线路径优化问题	123
8.4.2 蚁群算法与路径优化	124
8.4.3 基于 MPI 的蚁群并行算法	125
8.4.4 仿真结果及分析	126
第 9 章 蚁群算法的收敛性与蚁群行为模型	128
9.1 基于 Markov 过程的蚂蚁算法收敛性分析	128
9.1.1 简单蚂蚁算法(SAA)的描述	128
9.1.2 简单蚂蚁算法的收敛性分析	129
9.1.3 SAA 算法在函数优化中的应用	134
9.2 基于图解的蚂蚁系统及其收敛性	135
9.2.1 基于蚂蚁优化的基本思想	135
9.2.2 基于图解的蚂蚁系统	136
9.2.3 基于图解的蚂蚁系统的收敛性	140
9.2.4 基于图解的蚂蚁系统收敛性的一般解	149
9.3 基于波函数的蚁群行为模型	150
9.3.1 蚂蚁群体行为的自组织机制	151
9.3.2 蚁群活动的波函数描述模型	152
9.3.3 检验蚂蚁行为模型的实验设想	154
第 10 章 蚁群算法在优化问题中的应用	156
10.1 蚁群算法在求解优化问题中的应用概况	156
10.1.1 在静态组合优化中的应用	156
10.1.2 在动态组合优化中的应用	157
10.1.3 在求解连续空间优化问题中的应用	158

10.1.4 在其他领域的应用	158
10.2 蚁群优化(ACO)算法在动态组合优化中的应用	159
10.2.1 电信网路由及其选择方法	159
10.2.2 基本动态路由方法	161
10.2.3 网络路由与蚁群优化算法	162
10.3 应用蚂蚁算法对 QoS 组播路由问题求解	168
10.3.1 QoS 组播路由模型	168
10.3.2 基于蚂蚁算法的 QoS 组播路由问题	169
10.3.3 实验结果及分析对比	171
10.4 改进的蚁群搜索算法在热电联产经济调度中的应用	174
10.4.1 热电联产经济调度问题的描述	174
10.4.2 简单的蚁群搜索算法及其在 CHP 中的困难	175
10.4.3 改进蚁群搜索算法的技术	176
10.4.4 数字测试结果及结论	179
10.5 蚁群算法在机器人中的应用	181
10.5.1 蚁群优化算法在机器人路径规划中的应用	181
10.5.2 蚁群算法在多机器人协作策略中的应用	185
10.6 应用蚁群优化算法学习模糊规则	189
10.6.1 基于模糊规则的系统	189
10.6.2 模糊规则学习问题	190
10.6.3 模糊规则学习的蚁群优化算法	191
10.6.4 在模糊建模和电力工程中的应用	194
附录	197
附录 1 常用的几种蚁群算法伪码程序	197
附录 2 旅行商问题的蚁群算法源程序	204
蚂蚁系统和蚁群系统的源程序	204
最大-最小蚂蚁系统和最优-最差蚂蚁系统的源程序	216
附录 3 TSP Benchmark 问题	232
参考文献	236

第1章 绪 论

本章首先指出蚂蚁是一种社会性昆虫,介绍蚂蚁的基本习性,信息系统;其次重点阐述蚂蚁的觅食行为和觅食策略,人工蚁的基本思想以及人工蚁与真实蚂蚁的异同;最后,介绍人工蚁群算法的实现过程及其应用概况。

1.1 蚂蚁的基本习性

蚂蚁是一种最古老的社会性昆虫,它的起源可追溯到1亿年前,大约与恐龙同一时代。这种看似简单的小东西很早就引起了人们的注意。在楚汉相争之时,汉高祖刘邦的谋士张良用饴糖作为诱饵,使蚂蚁“闻糖”而聚,组成了“霸王自刎乌江”6个大字,项羽到此以为天意,吓得失魂落魄,拔剑自杀而死。“汉家天下,蚂蚁助成”的故事从此流传开来。

蚂蚁属膜翅类,蚁总科,已知360属,约9 000种,估计应有12 000~15 000种。数以百万亿计蚂蚁悄悄地布满了我们的星球,像人类一样,蚂蚁占据了几乎每一片适于居住的土地,只有永远雪封的南北两极未曾被其涉足。蚂蚁虽然有成千上万种,但无一种是独居的,都是群体生活,建立了自己独特的蚂蚁社会。

1.1.1 蚂蚁的信息系统

蚂蚁的个体结构和行为很简单,单个工蚁能做的各种动作不超过50个,其中大部分是传递信息,但由这些简单的个体所构成的整个群体——蚁群,却表现高度结构化的社会组织,在很多情况下能够完成远远超出蚂蚁个体能力的复杂任务。蚂蚁社会中的个体从事不同的劳动,群体可以很好地完成个体的劳动分工。作为社会昆虫的一种,蚂蚁社会成员除有组织有分工之外,还有相互的通讯和信息传递。蚁群有着独特的信息系统,其中包括视觉信号、声音通讯和更为独特的信息素。蚂蚁之所以能够“闻糖”而聚,全因蚂蚁的信息系统。

蚂蚁有着奇妙的信息系统^{[1][5]},其中包括视觉信号、声音通讯和更为独特的无声语言,即包括化学物质不同的组合、触角信号和身体动作在内的多个征集系统,来策动其他个体。蚂蚁特有的控制自身环境的能力,是在其高级形式的社会性行为不断发展的过程中获得的。

研究表明,观察到的黄猱蚁(*Oecophylla smaragdina*)的信息系统,是已知的社会性昆虫中最复杂和最先进的。黄猱蚁身上有多个分泌信息素的腺体及相关器官,如图1-1所示。

其中,上颚腺分泌多种无毒化学物质,主要用于防卫和报警;嗦囊储存液体食物,可反刍给蚁伴做信息传递;中肠用于消化分解食物;毒腺可产生大量蚁酸用以捕食、麻醉和防卫,并常使蚁群异常兴奋;杜氏腺主要分泌脂肪族碳水化合物,起着报警、召集作用;直肠腺分泌示踪信息素,常以大滴粪便物质来标记其势力范围;腹腺具有定向、短距离召集、标迹等功能。



图 1-1 黄猱蚁工蚁的信息素分泌腺体及相关器官

应当指出,不是任何蚂蚁都具有上述腺体,其腺体的功能也因种类不同存在差异。

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,信息素可以作为请求或交换营养性卵和特殊臀区分泌物的表示。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活动的作用。除此之外,蚂蚁以信息素来表明身份,蚁伴也据此辨认识别,失去同巢的信息素就会失去生命,在这一蚁群中无立足之地。

1.1.2 蚁群社会的遗传与进化

在研究蚁群社会成员的相互合作和利他主义(altruism)的同时,应当指出其存在着遗传学基础。社会性昆虫蚂蚁的有性生殖同二倍体物种的有性生殖略有不同,因它们是单一二倍体。蚁后产下的受精卵发育成工蚁或新的蚁后,而未受精卵发育成雄蚁,雄蚁是单倍体,而雌蚁(工蚁和蚁后)是二倍体。由此计算,工蚁(亲姐妹)之间的亲缘系数应当是 0.75,而不是 0.5,因为工蚁都有来自单倍体父亲的一套相同的基因,而工蚁的另一半基因则是二倍体母亲体内基因的一半(生殖前进行减数分裂的结果),所以在蚂蚁社会中,姐妹情是大于母女情的。由此看来,合作行为和利他行为在一个亲缘关系最密切的家庭中应当得到最大的发展。

蚂蚁的行为更多地是以群体作为一个整体而存在,而不是为了群体中的单个个体的存活。正是这种高度进化的社会性适应,使蚂蚁这种古老而细小的昆虫在大千世界中占有一席之地,并不断得以繁衍,被誉为昆虫世界的“智慧之花”。

1.2 蚁群觅食行为与觅食策略

1.2.1 蚂蚁的觅食行为

觅食行为是蚁群一个重要而有趣的行为。据昆虫学家的观察和研究发现,生物世界中的蚂蚁有能力在没有任何可见提示下找出从蚁穴到食物源的最短路径,并且能随环境

的变化而变化地搜索新的路径,产生新的选择。

在从食物源到蚁穴并返回的过程中,蚂蚁能在其走过的路径上分泌一种化学物质 Pheromone——信息素,也称信息素或外激素,通过这种方式形成信息素轨迹。蚂蚁在运动过程中能够感知这种物质的存在及其强度,并以此指导自己的运动方向,使蚂蚁倾向于朝着该物质强度高的方向移动。信息素轨迹可以使蚂蚁找到它们返回食物源(或蚁穴)的路径,其他蚂蚁也可以利用该轨迹找到由同伴发现的食物源的位置。

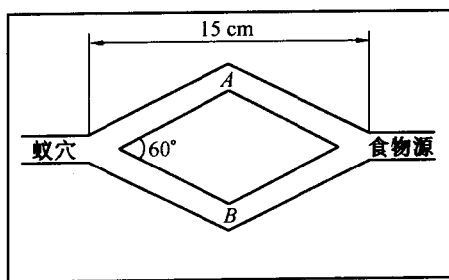
很多蚂蚁种族在觅食时都有设置踪迹和追随踪迹的行为:在从某个食物源返回蚁巢的过程中,蚂蚁个体会遗留一种信息素,觅食的蚂蚁会跟随这个信息素踪迹找到食物源。一只蚂蚁进军食物源受到另一只蚂蚁或信息素踪迹的影响过程称为征兵,而仅仅依靠化学踪迹的征兵叫做大规模征兵。

事实上,蚂蚁个体之间是通过接触提供的信息传递来协调其行动的,并通过组队相互支援,当聚集的蚂蚁数量达到某一临界数量时,就会涌现出有条理的“蚁队”大军。蚁群的觅食行为完全是一种自组织行为,蚂蚁根据自我组织来选择去食物源的路径。

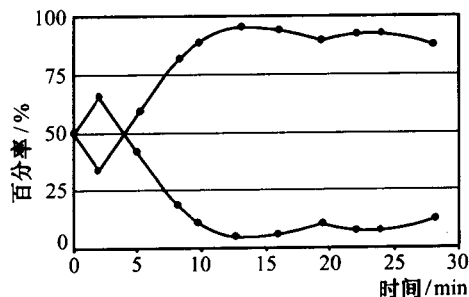
1.2.2 蚂蚁的觅食策略

1. 自然优化——二元桥实验

为了研究在受约束条件下的蚂蚁觅食行为,Deneubourg 等人曾提出双支桥实验^[5,6]。实验中,蚁穴通过双支桥与食物源相连,而桥的两个分支长度相等,而且两个分支上最初都没有信息素。然后,将蚂蚁置于可以自由地在蚁穴和食物源之间移动的状态,观察选择两个分支的蚂蚁比例。结果如图 1-2(b)显示,经过最初的一个短暂的振荡阶段,蚂蚁倾向于沿着一相同的路径前进。



(a) 实验的建立



(b) 实验的结果

图 1-2 等长双支桥实验

在上述的实验中,两个分支上最初没有信息素,因此,蚂蚁选择两个分支的概率是相同的。然而,经过最初的一个短震荡阶段,随机的振荡使得更多的蚂蚁随机地选择了一个

分支。实验中选择上边分支的蚂蚁多于下边分支的蚂蚁,如图 1-2(b)所示,纵坐标为单位时间内通过每个分支的百分率,横坐标为时间,单位为 min。由于蚂蚁在行进的过程中释放信息素,因此上边分支的信息素量多于下边分支,从而促使更多的后续蚂蚁选择它,依此类推。在实验中,首先假设一个分支上的信息素量正比于过去使用过该分支的蚂蚁数量。就是说,不考虑信息素的挥发。由于一个典型的实验持续大约 1 h,在这段时间内信息素的挥发量非常小,因此忽略挥发的信息素是可以理解的。模型中,在某个特定时刻选择一个分支的概率取决于这个分支上信息素的总量,而信息素的量与那一时刻前经过该分支的蚂蚁数量成正比。

Deneubourg 等^[144]开发了一个信息素模型,它的行为与实验的观察十分吻合。假设一个分支上的信息素量与从这个分支过桥的蚂蚁数量成比例。这个假设没有考虑信息素的挥发,因为实验持续 1 h 的时间,这还不足以让信息素大量减少,所以这个假设是合理的。在这个模型里,在某一时刻选择一条分支的概率依赖于已经使用过此分支的蚂蚁总数。更准确地讲,设 A_i 和 B_i 是第 i 只蚂蚁过桥后已经走过分支 A 和分支 B 的蚂蚁数,第 $i+1$ 只蚂蚁选择分支 $A(B)$ 的概率是

$$P_A = \frac{(k + A_i)^n}{(k + A_i)^n + (k + B_i)^n} = 1 - P_B \quad (1-1)$$

公式(1-1)表明,以往走分支 A 的蚂蚁越多,选择分支 A 的概率越高。参数 n 决定选择公式(1-1)的非线性程度,当 n 值大时,如果某一分支的信息素比另一分支稍稍多一点,那么后续的蚂蚁选择此分支的概率高。参数 k 表示对未标记的分支的吸引力程度: k 值越大,就有越多的信息素使选择非随机化。 P_A 的特殊形式是从文献[145]的路径实验上获得的。文献[144]给出最适合实验测量标准的参数值是 $n \approx 2$, $k \approx 20$ 。如果 $A_i \gg B_i$ 且 $A_i \gg 20$, $P_A \approx 1$; 如果 $A_i \gg B_i$ 而 $A_i < 20$, 则 $P_A \approx 0.5$, 这对 P_B 也适用。选择动态遵循公式(1-1),而 A_i 、 B_i 由公式(1-2)、(1-3)分别给出。

$$A_{i+1} = \begin{cases} A_i + 1 & \text{如果 } \delta \leq P_A \\ A_i & \text{如果 } \delta > P_A \end{cases} \quad (1-2)$$

$$B_{i+1} = \begin{cases} B_i + 1 & \text{如果 } \delta > P_A \\ B_i & \text{如果 } \delta \leq P_A \end{cases} \quad (1-3)$$

$$A_i + B_i = i \quad (1-4)$$

其中, δ 是一个在 $[0, 1]$ 中均一分布的随机变量。

图 1-3 中曲线表示通过优势分支蚂蚁占过桥所有蚂蚁数的百分率。黑实线是对公式(1-1) ~ (1-4)提供的模型的 200 个蒙特卡洛

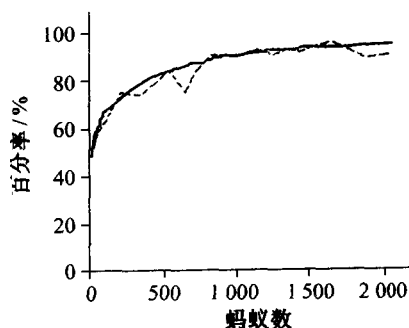


图 1-3 通过优势分支的百分率

模拟的平均结果,每个模拟中有 2 000 个蚂蚁通过。细虚线是每通过 100 只蚂蚁当中走占优势分支的百分率。上述结果均是 20 组实验的平均结果,每 30 min 一组实验。实验中用到 9 个蚁群,每群有 150 ~ 1 200 只工蚁。通过蒙特卡洛模拟分析了公式(1-1) ~ (1-4) 描述的模型,模拟结果与图 1-3 给出的实验结果完全吻合。

桥的等长分支的实验可以扩展到一个分支比另一个分支长的不对称情况,如图 1-4 所示^[146],其中(a)表示不对称桥的尺寸,(b)和(c)分别为桥放置 4 min 和 8 min 后蚁群对短分支的选择图。同样地,模型也可以修改来适应此情况。按照同以前情况相同的机理,也就是初始波动的扩大,蚂蚁常常会选择最短的路径:先回蚁巢的蚂蚁在最短分支上走了两次(从蚁穴到食物源,再回到蚁穴)。所以,这些蚂蚁回来后不久,在短分支上有更多的信息素,诱使巢中同伴选择短分支。实验表明,通过初始波动的扩大,最终选择短分支的几率随着两个分支的长度比 r 而增长。

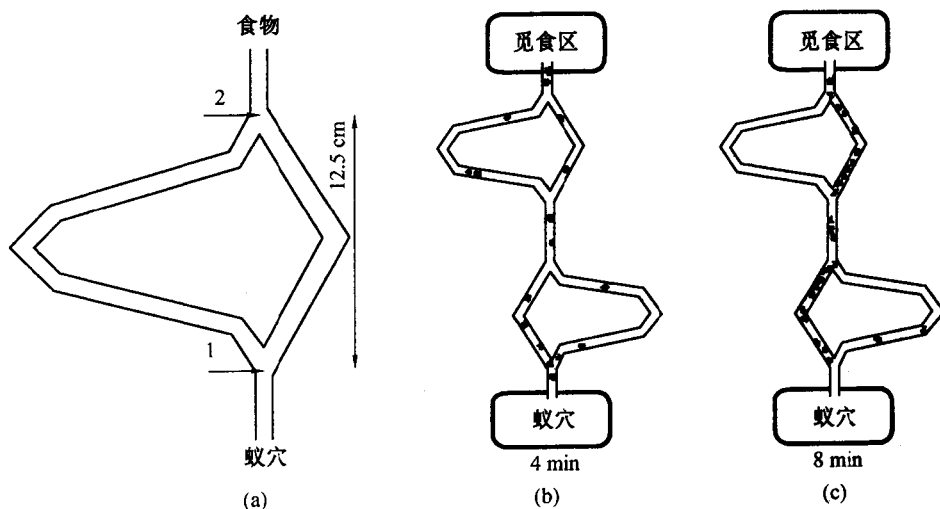


图 1-4 蚂蚁通过不等长双支桥的实验

图 1-5 表示在 n 个实验中,选择较短分支的蚂蚁的百分率分布情况(r 是两个分支的长度比)。较长分支比短分支长 r 倍,其中图(a)对应于长短分支在实验开始时就被放置好的情况。(a)图表明当 $r = 2$ (长分支的长度是短分支的 2 倍) 时,只是在统计意义上选择短分支。在某些情况下,更多的蚂蚁初始选择长分支,就使长分支上的标记更强,导致蚂蚁优先选择长分支。这表明主要基于信息素的征兵可能不够灵活。图 1-5 中的(b)图显示在相同的实验设置下,短分支比长分支晚 30 min 提供给蚁群后所发生的情况:蚂蚁没有选择短分支,而是继续陷于长分支上。图 1-6 是真实实验的图像,其中蚁巢位于下方的场地,食物源位于上方的场地。

Lasius niger 是另一种采取大规模征兵的蚂蚁种族使用的另一种机制,使得即使短分

支比长分支晚 30 min 出现,蚂蚁也会选择短分支。当蚂蚁发现它自己处在长路径中间时,这只蚂蚁通常会意识到它在近乎垂直地朝目的方向行进:这会迫使蚂蚁在长分支上进行 U 型转弯^[147]。在这种情况下,对蚁巢方向和食物源方向的个体记忆的结合,加上集体的踪迹追随,产生对短分支的系统选择(图 1-7)。换句话说,蚁群更加灵活了。

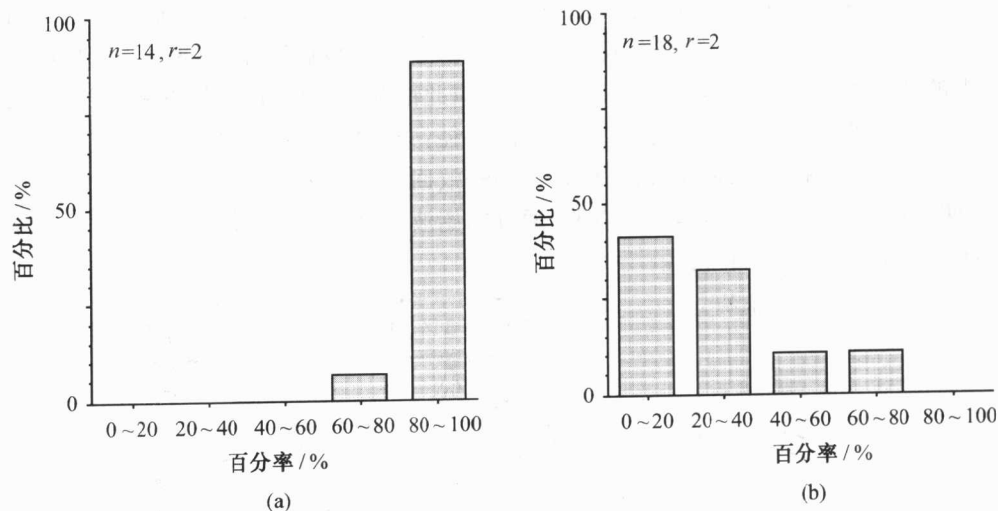


图 1-5 蚂蚁通过短分支桥的百分率分布情况

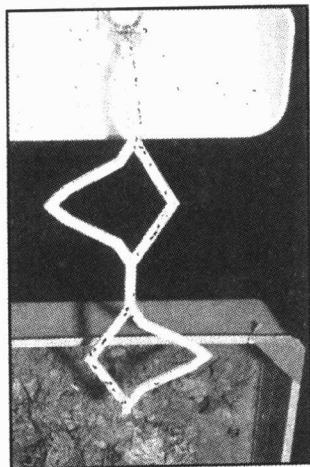


图 1-6 真实的二元桥实验

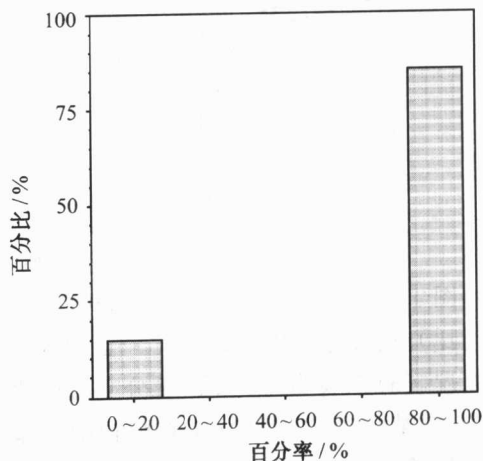


图 1-7 蚂蚁通过短分支桥的百分率

图 1-7 与图 1-4 的实验设置相同,但图 1-7 是对 *Lasius niger* 的实验。在这种情况下,当短分支在长分支后出现时,对蚁巢方向和食物源方向的个体记忆的结合,加上集体的踪迹追随,产生对短分支的更加系统的选择。

在上面提到的基于信息素征兵的蚂蚁种群中,要了解信息素的物理化学特性是很有趣的,可以说对这些化学物质的了解尚不多。在不同的底土层上,并且/或者在可变长度的时间后,测试蚂蚁遇到不同量信息素之后行为的“间接”实验提供了数量粗略的近似值,如挥发速率、吸收速率、扩散常数等。对上述种族的一致发现是它们的信息素持续很长时间,从最少的几个小时到几个月(依赖于种族、底土层、蚁群规模、天气条件等)。这表明信息素的寿命需要用大的时间尺度来测量。

在蚁群优化和蜂群智能领域,常识表明,当使用足够短的时间尺度时,信息素挥发可以使蚁群避免陷于次优的路径上,如 *Linepithema humile* 蚁群的情况。这是因为要在较长的路径上保持标记好的信息素踪迹的难度更大,如图 1-8 所示^[148,149]。

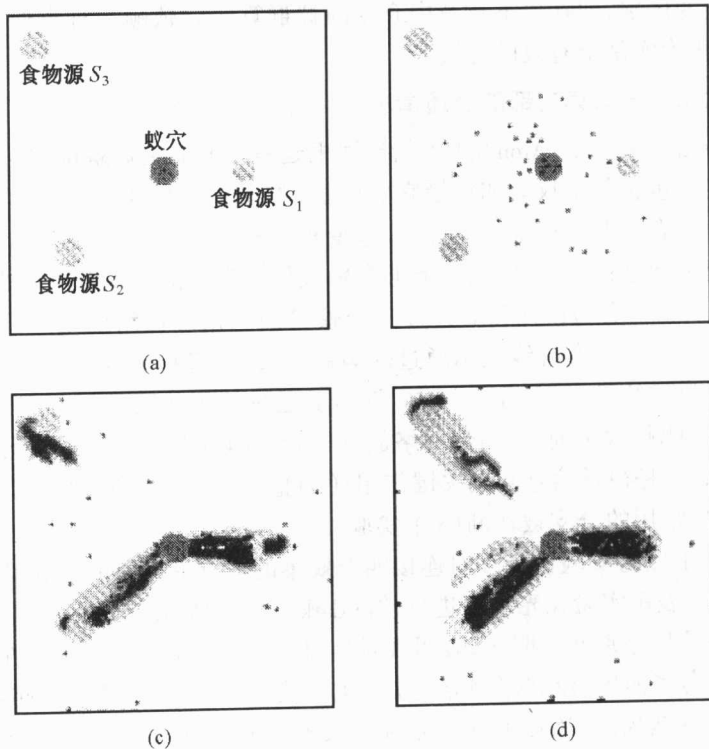


图 1-8 对三个等量食物源蚂蚁的觅食情况

图 1-8 是模拟 3 个等量食物源 S_1 、 S_2 及 S_3 放置在离蚁巢不等距离的情况(图 1-8(a))。从食物源返回蚁巢的蚂蚁在路上放置信息素,出蚁巢的蚂蚁跟随信息素踪迹,或者在没有信息素时随机地走。踪迹追随是受随机性影响的,错误可能会发生,而且蚂蚁可能找不到遗留的踪迹。假设信息素的衰减在短时间尺度内发生,在 t_1 时刻,由黑点儿表示的蚂蚁随机地探测它们的环境(图 1-8(b))。在 t_2 时刻,建立了连接食物源和蚁巢的路径