

第 1 章 蚁群算法的由来

1.1 群体智能及典型算法实现

受社会性昆虫行为的启发，智能自动化、智能计算等相关领域的研究工作者通过对其行为的模拟，产生了一系列寻优问题求解的新思路，这些研究可被称为针对群体智能的研究。群体智能（Swarm Intelligence）中的群体Swarm是指“一组相互之间可以进行直接通信或者间接通信（通过改变局部环境），并且能够合作进行分布问题求解的主体”。而所谓群体智能是指“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”。这样，群体智能的协作性、分布性、鲁棒性和快速性的特点使之在没有集中控制，并且不提供全局模型的前提下，为寻找复杂的大规模分布式问题的解决方案提供了基础。

群体智能的优点可以描述如下：

（1）群体中相互合作的个体是分布式的，这样的分布模式更适合于网络环境下的工作状态。

（2）系统没有集中的控制指令与数据存储，这样的系统更具有鲁棒性，不会由于某一个或者某几个个体的故障而影响整个问题的求解进程。

（3）系统不通过个体之间的直接通信，而通过非直接通信方式进行信息的传输与合作，这样的系统具有更好的可扩充性，由于系统中个体的增加而增加的通信开销也较小。

（4）系统中每个个体的能力十分简单，每个个体的执行时间也比较短，并且实现较为方便，具有简单性的特点。

由于具有以上这些优点，虽说关于群体智能的研究还处于初

级阶段，并且还存在着许多困难，但是我们可以预言，群体智能的研究代表了智能控制及智能计算研究发展的一个重要方向。

作为群体智能的典型实现，模拟生物蚁群智能寻优能力的蚁群算法和模拟鸟群运动模式的微粒群算法正在受到学术界的广泛关注。其中，蚁群算法由于所提出的时间相对较早，已经得到了广大研究人员较为充分的研究。这也是本书的论述重点。

1.2 基本蚁群算法的起源

蚂蚁是地球上最常见、数量最多的昆虫种类之一，常常成群结队地出现于人类的日常生活环境中。这些昆虫的群体生物智能特征，引起了一些学者的注意。意大利学者 M. Dorigo, V. Maniezzo 等人在观察蚂蚁的觅食习性时发现，蚂蚁总能找到巢穴与食物源之间的最短路径。经研究发现，蚂蚁的这种群体协作功能是通过一种遗留在其来往路径上的叫做信息素 (Pheromone) 的挥发性化学物质来进行通信和协调的。化学通信是蚂蚁采取的基本信息交流方式之一，在蚂蚁的生活习性中起着重要的作用。通过对蚂蚁觅食行为的研究，他们发现，整个蚁群就是通过这种信息素进行相互协作，形成正反馈，使多个路径上的蚂蚁逐渐聚集到最短的那条路径上来的。

这样 M. Dorigo 等人于 1991 年首先提出了蚁群算法。其主要特点就是：通过正反馈、分布式协作来寻找最优路径。这是一种基于种群寻优的启发式搜索算法。它充分利用了生物蚁群能通过个体间简单的信息传递，搜索从蚁穴至食物间最短路径的集体寻优特征，以及该过程与旅行商问题求解之间的相似性，得到了具有 NP 难度 (Non-deterministic Polynomial Completeness) 的旅行商问题的最优解答。同时，该算法还被用于求解 Job-Shop 调度问题、二次指派问题，以及背包问题等，显示了其适用于组合优化类问题求解的优越特征。

1992年,M. Dorigo 在他的博士论文中进一步提出了蚁群系统 (Ant System, AS)。在这篇论文中,根据信息素增量的不同计算方法,M. Dorigo 给出了三种不同的模型,分别称之为蚁周、蚁量和蚁密模型;同时通过大量实验,讨论了不同参数对算法性能的影响,确定了算法主要参数的有效区间。

这样蚁群算法 (Ant Colony System, ACS) 所表现出来的群体智能就很好地模拟了蚁群做事的流程性及柔性分工特征,并且模拟了蚁群处理工作链脱节和延迟问题所采取的岗位替补与协同模式。

通过多年来世界各地研究工作者对蚁群算法的精心研究和应用开发,该算法现已被大量应用于数据分析、多机器人协作问题求解以及电力、通信、水利、采矿、化工、建筑、交通等领域。

这里,要解释简单的程序规则如何使蚁群算法完成如此复杂的功能,其答案只能是:简单规则中的智能涌现。事实上,每个蚂蚁智能体并不是像我们想像的那样需要知道整个世界的信息,它们只需要关心很小范围内的局部信息,而且只需根据这些局部信息,利用几条简单的规则来进行决策。这样,在蚁群算法的群体求解模式中,其复杂性的性能特点就会通过群体协作凸显出来。这就是人工生命、复杂性科学的根本规律。

1.3 蚁群个体的运动规则

作为蚁群算法的蚂蚁个体,其运动和通信的简单规则只需包含以下几个主要方面:

(1) 搜索范围:可具体设定蚁群个体的搜索参数半径,这样就限制了其运动过程中的观察能力和移动距离。

(2) 局部环境:蚂蚁个体仅需要感知它周围的局部环境信息,并且该局部环境中的信息素是按一定速度消失的。

(3) 觅食规则:每只蚂蚁只在其能感知的范围内进行信息探索和留存,在局部环境中,哪一点的信息素最多,就以较大的概率

决定了它的运动方向。这样，虽然在其运动过程中，会出现小概率的搜索错误，但从总体上说，其搜寻的效率和正确性会通过其他蚂蚁的行为反馈加以调整。

(4) 移动规则：每只蚂蚁都朝信息素最多的方向移动，当周围没有信息素指引的时候，蚂蚁会按照自己原来运动的方向惯性地运动下去，并且，在运动的方向上有一个随机的小的扰动，以保留原来的运动记忆。如果发现有其已经经过的地点，则以较大概率进行避让。

(5) 避障规则：如果在蚂蚁即将移动的方向上存在障碍物，则它会随机选择另一个方向，或者按照信息素的指引继续其觅食行为

(6) 通信规则：实际上，每只蚂蚁是通过其信息素的播撒和感知来进行通信的。其具体规则是多元化的，它可以在找到相对最优解的时候散发最多的信息素，并且随着它走的距离越来越远，播撒的信息素越来越少。

1.4 实例说明及应用状况

这里，我们先来看一下蚁群的最短路径搜寻过程。其中，信息素的散发和感知是最重要的。信息素多的地方，经过的蚂蚁就多，经过一段时间的正反馈过程，就会有更多的蚂蚁聚集过来。假设有两条路从蚁穴通向食物。开始的时候，走这两条路的蚂蚁数量同样多（或者在较长的路上蚂蚁多一些，这无关紧要）另外，蚂蚁沿着一条路到达终点以后就马上返回。这样，在短的路径上，蚂蚁来回一次的时间就短，这也意味着其路程重复的频率就快，因而在单位时间里走过的蚂蚁数目就多，撒下的信息素自然也会多，其后自然会有更多的蚂蚁被吸引过来，从而撒下更多的信息素……而长的那条路上情况正好相反。因此，随着时间的推移，越来越多的蚂蚁会聚集到较短的路径上来，这样就近似找到了最短路径。对

于局部最短路径和全局最短路径的问题，即局部最优和全局最优的问题求解模式，可以说，实际上蚂蚁是逐渐接近全局最优的。这源于蚂蚁会按照一定的概率不往信息素高的地方走而另辟蹊径，这可以理解为一种创新。这种创新如果能缩短路途，那么根据刚才叙述的原理，更多的蚂蚁就会被吸引过来。

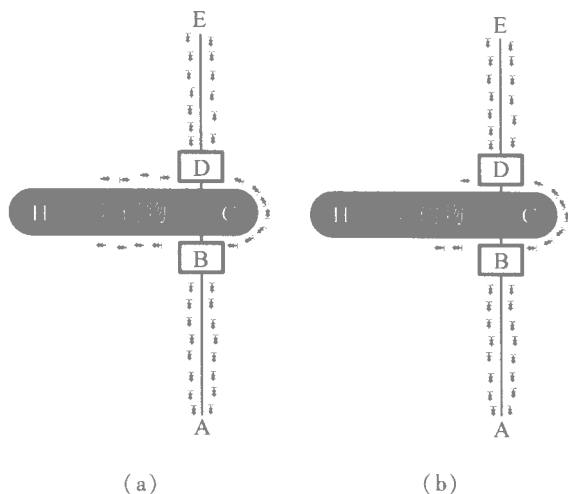


图 1-1 生物蚁群搜索过程示例

图 1-1 具体说明了这个过程 从 A 出发到 E 有两条路径 左边的较长，右边的较短。在这两个图中，开始的时候 [图(a)] 蚂蚁选择两条路径的机会是均等的，当时间逐渐流逝以后 [图(b)] 更多的蚂蚁就会聚集到右边较短的路径上来。

在蚂蚁运动过程中，其之所以具有智能行为，完全归功于它的简单行为规则，而这些规则综合起来又具有多样性和正反馈这两个方面的特点。多样性保证了蚂蚁在觅食的时候不进入无限的死循环，而正反馈机制则保证了相对优良的信息能够被保存下来。这里，我们可以把多样性看成是一种创造能力，而正反馈则是一种

学习强化能力。正反馈的力量也可以被比喻成权威的意见，多样性则是打破权威而体现的创造性，正是这两点的巧妙结合才使得智能行为涌现了出来。

蚁群原先有一条行走的路径 [比如从食物 A 到穴 E 反之亦可,见图 1-1(a)]。之后,突然出现了一个障碍物,切断了这条路径。这样,从 A 到 E 的蚂蚁在 B 点 (或反方向移动的蚂蚁在 D 点) 就必须决定是向左移动还是向右移动 [见图 1-1(b)]。在整个决策过程中,受先行蚂蚁所留下的气息痕迹的强度影响,右边路径上气息的较高浓度将给蚂蚁更强烈的刺激。因此,总体上蚂蚁向右转的概率会更大一些。当然,第一只到达 B (或 D) 点的蚂蚁向右转或向左转的概率是相等的 (这显然是由于在可供选择的两条路径上没有任何历史气息所致)。由于路径 BCD 比 BHD 要短,因此第一只沿此路径前进的蚂蚁将在第一只沿 BHD 前进的蚂蚁之前到达 D。结果,一只从 E 回到 D 的蚂蚁在路径 DCB 上就会发现有较多的气息痕迹,这是由那些随机决定通过 DCBA 绕过障碍物的半数从 E 到 A 方向的蚂蚁,和那些已经通过 BCD 到达 E 的蚂蚁留下的。因此,它们将更倾向于选择 (在概率意义上) 路径 DCB 而不是 DHB。最终,单位时间通过路径 BCD 的蚂蚁数将比通过 BHD 的蚂蚁数更大。这就使短路径上的气息比长路径上的气息增长更快,故而所有的蚂蚁选择路径的概率将很快地偏向较短的路径。最后,所有蚂蚁都会很迅速地作出反应,选择较短的路径。

以蚁群算法为代表的群体智能已成为当今分布式人工智能研究的一个热点,许多源于蜂群和蚁群模型设计的算法已越来越多地被用于企业的运转模式的研究。美国五角大楼正在资助关于群体智能系统的研究工作——群体战略 (Swarm Strategy) 它的一个实战用途是通过运用成群的空中无人驾驶飞行器和地面车辆来转移敌人的注意力,让自己的军队在敌人后方不被察觉地安全行进。

英国电信公司和美国世界通信公司以电子蚂蚁为基础,对新的电信网络管理方法进行了试验。群体智能还被应用于工厂生产计划的制定和运输部门的后勤管理。美国太平洋西南航空公司采用了一种直接源于蚂蚁行为研究成果的运输管理软件,结果每年至少节约了 1000 万美元费用开支。英国联合利华公司已率先利用群体智能技术改善其一家牙膏厂的运转状况。美国通用汽车公司、法国液气公司、荷兰公路交通部和美国一些移民事务机构也都采用这种技术来改善其运转的机能。鉴于群体智能广阔的应用前景,美国和欧洲联盟均于近几年开始出资资助基于群体智能模拟的相关研究项目,并在一些院校开设群体智能的相关课程。牛津大学出版社 1999 年出版的 E. Bonabeau 和 M. Dorigo 等人编写的专著《群体智能:从自然到人工系统》(*Swarm Intelligence: From Natural to Artificial System*)以及 2001 年出版的 J. Kennedy 和 R. Eberhart 编著的《群体智能》(*Swarm Intelligence*)进一步扩大了群体智能的影响。IEEE 进化计算会刊也于 2002 年 8 月出版了蚁群优化算法特刊。国内,国家自然科学基金“十五”期间学科交叉类优先资助领域中的认知科学及其信息处理的研究内容中也明确列出了群体智能领域的进化、自适应与现场认知主题。

1.5 蚁群算法的研究及应用领域纵览

由前面的论述可知 蚁群算法是一种启发式算法,它来源于对蚂蚁群体搜索行为的研究。它还充分模拟了实际蚁群寻求最短路径的协作优化特性。由于蚂蚁寻求最短路径的行为类似于旅行商(TSP)问题的解决过程,因而蚁群算法能在 TSP 问题实例中得到最优的结果。另外,蚁群算法还被用于作业车间调度问题、二次分配问题、多维背包问题、数据的特征聚类过程,并取得了很好的寻优结果。

蚁群算法在解决组合优化类问题求解方面表现出了突出的适

用特征。人工蚁群中的多个智能体通过正反馈确保了最优化过程的快速性，而早熟收敛则可以由蚁群算法的分布式计算特性来加以避免。同时，由于它的贪婪式启发搜索特性，在搜索过程的早期就可以找到可以接受的解。这样，在一种问题求解模式中，同时结合了问题求解的快速性、全局最优特征以及在优化过程初期解的合理性等特性，从而引起了相关领域研究者的注意。

通过相关领域研究者的关注和努力，蚁群算法在最初模式的基础上得到了许多改进和扩展，并在大量领域获得了应用，比如机器人系统、图像处理、制造系统、车辆路径系统、通信系统、工程设计领域及电力系统等。它还被用于各类动态资源分配、行动规划和数据聚类等相关问题的研究中。

在本章中，作者将全面讨论用于离散空间优化的传统蚁群算法。在后续章节中，作者将把蚁群算法引入连续空间优化过程的研究工作作一阶段性总结。

1.5.1 适用于离散空间优化问题的蚁群算法

如前所述，蚁群算法是一种分布式寻优算法，适用于 TSP 问题的求解。在蚁群算法中，包含了一组称为蚂蚁的协作智能体，它们通过一定的策略进行互相合作及间接信息交互，从而搜索 TSP 问题的最优解。在人工蚁群中，被定义的人工蚂蚁使用信息素（或可叫做痕迹）来进行互相的交流。许多论文中的结果表明，蚁群算法要优于其他受自然启发得出的寻优算法。由于人工蚁群的移动类似于实际的蚁群旅行，所以将它用于对称的或不对称的 TSP 问题是可以有直接对应的方法的。在这些应用中，蚁群的正反馈特性有助于快速发现好的解，而贪婪启发式规则有助于在搜索过程的初期找到可以接受的解。

蚁群算法也可被用于作业车间调度问题。在相关文献研究中，提出了用于改善蚁群算法性能的策略；然后将其用于作业车间调度问题，还研究了蚁群算法的领导者 and 精英策略。另外，还引人

了带延迟的学习思想来改善蚁群算法的性能，并在其中强调了合作策略的作用。

在解决二次指派问题(QAP)时，可以使用一个结合局部搜索策略的混合蚁群算法。它使用信息素来修正二次指派问题的解，而不像传统的蚁群算法那样使用信息素来构造完整的解。在此领域的研究中，可以定义一个与蚁群算法一致的启发式策略。它所具有的一个显著特征是，在每一个构造步中使用了一个新的下界。为了评价基于蚁群算法求解的性能，有人将其用于二次指派问题的几个典型实例，并将所得的结果与其他进化算法和启发式算法相比较。另外，为了解决子集问题，还可将蚁群算法进行修正，用于多维背包问题的典型实例计算研究。

蚁群算法还是一个灵活的特征数据聚类问题的求解工具，可以将蚁群算法与遗传算法结合起来，在选择其表示模式后，选择有效的聚类对象。

所有这些问题解决的过程都是在离散空间中进行的，在离散空间优化问题求解中，蚁群算法表现出了非凡的特性。

1.5.2 蚁群算法的改进

从蚁群算法发表并解决了旅行商问题之日起，它就引起了全世界相关研究领域的广泛关注。在此基础上，研究人员将传统蚁群算法进行了很多改进研究。

最具贪婪式寻优特征的改进蚁群算法为最大最小蚁群系统(Max-Min Ant System, MMAS)。它在几个重要的方面与传统蚁群算法不同，它具有增强的贪婪搜索特性，能有效地使局部搜索朝有希望的搜索空间前进。通过相关实例，可以看到它有比传统蚁群算法更好的寻优特性。

在改进的蚁群算法中 Ant-Q 算法是一种新颖的、分布式的增强型学习算法，它与 Q-learning 算法有很多相似点。在此框架下，传统的蚁群算法可被看作 Ant-Q 的一个特例。在一些实例中，

Ant-Q 算法比传统的蚁群算法性能要好。尤其是对于一些困难的非对称 TSP 问题, Ant-Q 能够找到通常只由专用算法才能找到的解。

将禁忌搜索作为局部搜索策略引入蚁群算法, 可以得到一个具有更强计算功能的算法。这种改进的蚁群算法可被用于一些大规模的布局或空间规划问题, 并且可以得到全局最优解。在具体的蚁群算法实现中, 禁忌搜索可被用于局部改进阶段, 产生一个增强型算法。

其他的智能算法模型, 如遗传算法、多智能体模型、阶次模型、增强型算法、基于图的一般框架模型、孤岛模型等, 也可被引入传统的蚁群算法, 以产生积极的改进效果。甚至还有研究者开发了一个基于蚁群模型的细胞神经网络 (Cellular Neural Network, CNN), 并将其用于电路的振荡和混沌特性的研究。蚁群的协作特征与遗传算法的进化特征可以结合起来, 以优化传统蚁群算法的性能。通过引入遗传算法, 就可以借助其进化过程来选择蚁群算法的优化参数。在多智能体模型中, 可以模仿实际的蚂蚁, 在其中可以有不同两类的智能体, 每一类都有特定的任务, 也可以根据问题求解的需要设定多个协作智能体。在考虑噪声的情况下, 所定义的智能体可以使用信息素来彼此交流。在基于蚁群算法的组合优化问题研究中, 已发现对于几个 TSP 实例在平均行为方面, 修正的蚁群算法可以与其他方法相竞争, 并且表现出更好的最差情况特征。所加强的蚁群算法是根据合作机制定义的。基于该算法可以设计一个开关箱断路器, 与其他基准例子相比, 它表现出较低的计算复杂度。基于图的蚁群算法来源于图的构造概念。相关文献指出, 在特定的条件下, 这种基于图的蚁群在每一代产生的解可以以任意接近于 1 的概率收敛于给定问题实例的最优解。在孤岛模型中, 几群蚂蚁智能体被用于蚁群优化算法, 并引入了一个预测函数, 用于使蚁群能根据决策后所达到的状态来决定蚁群的

运动。在产生同步振荡行为模式的 CNN 模型中，蚁群的行为模式可被用来作为创建该模型的原型。

其他研究者集中于对蚁群算法的启发式特性、在增强型学习框架下的蚁群建模、蚁群算法的形式描述、群体智能的计算模型等进行研究，并且在相关应用研究中取得了很大进展。

1.5.3 蚁群算法的工程应用

在蚁群算法的工程应用中，由于微型机器人（或移动机器人）的协调策略、行为策略、优化策略和蚁群系统有内在相似性，所以蚁群系统模型在多机器人系统协调、分布式控制规则设计、停滞恢复策略研究和气味传感机器人开发等方面有很大的参考意义。在微型机器人系统动态模型、微型自治机器人系统的群体行为设计、可移动机器人的行为控制系统、痕迹跟踪机器人蚂蚁和自治机器人的导航策略等领域，蚁群算法的思想也被引入其中。这些机器人系统模仿了蚁群系统的群体优化能力，并具有实际蚂蚁系统的协同操作、协同决策、协同优化和分布式通信特性。

在其他工程应用中，如交通系统控制中，蚁群算法还被引入公共汽车路线规划和其他类型的车辆路线规划问题。在通信网络应用中，蚁群智能体借助于运动协调和模拟信息素沉积来解决负载平衡问题。在电力系统应用中，故障单元估计问题可被描述为一个组合优化问题，因而也可以使用蚁群系统来解决。虽然热经济分配问题被分解为两个子问题，但是合作蚂蚁智能体可以有效地处理这个问题的约束，并给出合理的解。在制造系统控制中，也可以使用蚁群系统的通信和协调能力。在图像处理中，可以使用蚁群算法来揭示大图中的某些结构特征，还可将蚁群算法用于图像着色问题求解。在分布式自治系统的实现中，蚁群系统可用于动态资源配置和协调运动规划。

在工程设计领域还有一些蚁群算法的典型应用。例如，在化工领域中合成路径的设计和在串、并联系统中冗余配置问题的解

决中，都可引入相应的蚁群系统算法。

大多数蚁群算法研究主要是被用于解决离散空间中的优化问题的，但同时，对于连续空间中的优化问题，用蚁群算法也有了一些初步的结论。因为在大量的工程设计领域，设计问题总可以被描述为连续设计空间中的优化问题，因此也有一些文章中对蚁群算法作了相应修正，以使其适用于该领域。但是这些论文中没有给出一个直接适用于连续空间的蚁群算法框架。

关于蚁群算法的研究及应用成果，我们还要在后面的章节中进行详细的分类综述。

1.6 蚁群算法的总体特征及作者的工作

蚁群算法之所以能引起相关领域研究者的注意，是因为这种求解模式能将问题求解的快速性、全局优化特征以及有限时间内答案的合理性结合起来。其中，寻优的快速性是通过正反馈式的信息传递和积累来保证的，而其分布式计算的特征又避免了算法的早熟性收敛，同时，具有贪婪启发式搜索特征的蚁群系统又能在搜索过程的早期就找到可以接受的问题解答。这种优越的问题分布式求解模式经过相关领域研究者的关注和努力，已经在最初的算法模型基础上得到了很大的改进和拓展。

作者在近几年的工作中，将原适用于离散空间组合优化问题求解的蚁群算法的优越寻优模式拓展至连续空间内的线性和非线性函数寻优问题的求解中，证明了蚁群算法在连续空间寻优问题求解中的适用特征。在此基础上，进行了基于蚁群算法的系统参数辨识及智能控制研究，并在算法的计算机仿真实现之后，在国家高性能计算基金支持下进行了算法的并行实现机理研究，这些都为蚁群算法在实际系统中的应用实现开辟了道路。这在本书以后的内容中将进行介绍，并将论述系统的求解模式和应用模式。

第 2 章 蚁群算法的研究成果

1998 年 10 月 14 ~ 16 日, 首届蚁群优化国际会议在比利时布鲁塞尔召开。此次会议的目的是将有着不同兴趣爱好的研究人员和实践者聚拢在一起, 研究蚁群优化的本质及实现模式, 涉及的学科领域从生物学到物理学、工程学和计算机科学。会议考虑的主题是结构化复杂行为的分析和拟合, 包括简单通信智能体的大量合成, 其中把蚁群系统作为模型基础, 它标志着蚁群算法的研究已经得到了国际上的广泛支持。本章中, 我们将对蚁群系统的算法研究成果作一系统综述。

2.1 基本蚁群算法的提出和分析

近年来, 不同领域的研究者从适应性角度对生物行为模拟表现出了很大的兴趣。蚁群作为社会性昆虫, 在解决无法由单个蚂蚁所能执行的任务时显示了集体行为的作用。在蚁群中, 信息素是传递全局行为重要信息的媒介。

1996 年, M. Dorigo 等于 IEEE 刊物上发表了一篇奠基性论文, 文中对蚁群系统的最基本模型和特点进行了综合分析, 并通过实例仿真讨论了该模型的特征和应用。M. Dorigo 等还推荐将蚁群算法用于进行组合优化问题求解, 并指出该模型的主要特点是正反馈、分布式计算以及具有结构性特征的贪婪式搜索模式。其中, 正反馈特征可以解释蚁群寻优的快速性, 分布式计算避免了蚁群在寻优空间中的过早收敛, 而贪婪式搜索模式则有助于在搜索过程的早期阶段就找到可行的问题解答。论文中应用蚁群算法求解了经典的旅行商 (TSP) 问题 并给出了仿真结果。另外 还讨论

了算法的参数选择和早期建模问题，并将其与禁忌搜索法和模拟退火法在同一个问题（TSP）求解中进行了性能比较。为了说明该算法的鲁棒性，还讨论了如何将蚂蚁系统（AS）应用于其他的优化问题，如不对称旅行商（ATSP）问题、二次分配问题和作业安排调度等，并对蚁群算法的突出特性，包括全局数据结构校正、分布式通信和蚁群的概率转移特性等进行了分析。

由于蚁群以及大多数社会性的昆虫都是一个分布式的系统，其特点是个体简单，但能表现出很高的组织性和社会性。所以作为一个组织，蚁群能完成一些非常复杂的工作。而这样的工作对于单个蚂蚁来说是非常困难的。在计算机科学研究领域中，研究者对于蚁群的行为模拟和它们的自组织能力非常感兴趣，因为这些能力可以提供一种用于解决复杂的最优化和分布式控制问题的模型。从真实蚁群中可以抽象出来一些相关模型，特别是，已经有论文通过在蚁群筑巢信息传递过程中的应用范例，研究了其分布式自组织行为的模拟方式。

另外，在学习自动机的概念体系下，也可对蚁群算法进行分析。原先的学习自动机模型是用来从生理和心理上描述人的行为的，而有一类相互作用的学习自动机，它能够用来描述蚁群的各种行为能力，例如找到离蚁巢最近的食物、然后返回的能力。蚁群算法就是为模拟蚁群的群体智能行为而设立的。著名的互连式学习自动机，就是用于在分散模式下解决马尔可夫决策问题的标准模型，其模型结构和蚁群算法非常匹配。这样，通过学习自动机的研究，就能非常好地了解蚁群算法为何有效的原因，而且知道蚁群算法在多智能体系统（MAS）中为何能成为一个非常有用的理论工具。为了说明以上观点，有人给出了一个学习自动机直接用到一般马尔可夫游戏问题中的实例。

在蚁群系统设计中，合成信息素的作用是不可忽略的。有人对蚂蚁觅食行为中信息素的作用及蚂蚁社会中综合创造力的本质

进行了系统研究。该研究不仅具有公认的创造力特征，还提供了在不同应用领域中实践意义，并且给出了研究创造力本质和人工创造特性的科学方法。

如果将社会性昆虫的行为引入电脑计算领域，把蚁群本身设想成一个电脑网络，生物学家也可以将其复杂的行为模式进行分解。在此领域也有相关的论文报道，由于非本书重点，故在此不予赘述。

2.2 蚁群算法的改进综述

在基本蚁群算法被提出之后，已被多个领域的研究工作者进行了改进。其中包括最大最小蚁群算法、Ant-Q 算法、带禁忌搜索策略的蚁群算法、多群体蚁群算法、具有变异特征的蚁群算法、自适应蚁群算法、与其他智能算法相结合的蚁群算法等。这里，我们仅对一些效果较好的改进型蚁群算法进行综述。

2.2.1 最大最小蚁群系统

从其名称上就能很好理解该算法的主要特征。通过对传统蚁群优化算法——蚁群系统的研究，显示其作为一种解决离散空间内复杂组合优化问题的方法是可行的。然而，与其他具有规则性的算法相比，蚁群系统在处理很多传统基准问题，如 TSP 问题时，其性能相对来说还不是最好。为了证明蚁群优化算法也能够取代现存算法来处理复杂组合优化问题，最近在这个领域的研究主要集中在算法变量上，使算法变量的性能要比传统蚁群系统的好。有研究者提出了源自于蚁群系统的蚁群优化算法——最大最小蚁群系统 (MMAS)。该系统在几个重要的方面与传统蚁群系统有区别，他们的实验研究说明了该算法的有效性。此外，他们还将 MMAS 的特征之一（使用比蚁群算法更贪婪的搜索模式）与论文中涉及的组合优化问题的搜索空间分析结果联系起来，通过对旅行商问题和二次分配问题的计算机仿真，所得结果表明，MMAS 是

现存解决这些问题的算法中性能最好的。

2.2.2 多重蚁群算法

在 1991 年, A. Colomni 等通过对蚂蚁寻找食物的行为和使用信息素的通信方式类比, 提出用蚁群算法解决 TSP 问题。在基于蚁群算法的 TSP 问题求解中, 由许多简单的蚂蚁智能体组成蚁群, 这些蚂蚁智能体不断地访问各节点城市, 希望能找到连接最近城市的路线, 并留下很强的信息素, 完成旅程的蚂蚁根据距离的不同在它们所经过的路线上留下不同强度的信息素, 即在 TSP 巡游中有可能成为最佳路线的就留有更强的信息素。所以蚂蚁智能体通过使用这种正反馈机制, 能在搜索空间中找到最优解的存在区域。为了更好地解决 TSP 问题, 有论文提出了由传统蚁群算法扩展而来的多重蚁群算法。这种算法由几个蚁群来协同解决 TSP 问题, 而传统的蚁群算法中则只有一个蚁群。而且, 在蚁群群体层的交互作用中还使用了正负两种信息素效应。由于引入了群体层的交互作用, 蚁群就能更好地交换问题解决过程的规划信息, 并保持它们在搜索过程中的多样性。这样, 在使用几乎相同的智能体策略的条件下, 引入群体层交互作用的算法就比传统算法显示了更好的性能。

在多重蚁群算法中, 为了求解优化问题, 几个蚁群可以相互合作, 以找到最佳解答。在某些时间点上, 各蚁群可以相互交换好的解答信息。如果交换的信息量不太大, 则多重蚁群算法就能在不同的处理器上分配不同的蚁群, 从而轻易地实现并行处理。有论文详细研究了在蚁群间具有不同信息交换方式的多重蚁群算法的性能表现, 而且比较了多起点单蚁群算法中不同数量的蚁群行为, 并以 TSP 问题和二次指派问题作为测试问题。

2.2.3 具有变异特征的蚁群算法

蚁群算法是一种新型的模拟进化算法, 初步的研究已经表明该算法具有许多优良的性质。但该算法也存在一些缺点, 如计算

时间较长、执行复杂度较高等。为了克服这些缺点，有人给出了一种新的蚁群算法——具有变异特征的蚁群算法。在基本蚁群算法中可引入变异机制，这样就充分利用了二元交换法简洁高效的特点，使得该方法具有较快的收敛速度，达到节省计算时间的目的。已有计算机仿真结果表明，该方法是行之有效的。

2.2.4 自适应蚁群算法

在蚁群算法的自适应特性研究中，一种分布平衡的自适应蚁群算法显示了优越的寻优特征。针对蚁群算法加速收敛和早熟停滞现象之间的矛盾，有人提出了一种分布平衡的自适应蚁群算法，可以在加速收敛和防止早熟、停滞现象之间取得很好的平衡。该算法可以根据优化过程中解的分布平衡度，自适应地调整路径选择概率的确定策略和信息量更新策略。以数种对称和不对称 TSP 问题为例所进行的计算结果表明，该方法比一般蚁群算法具有更好的收敛速度和稳定性，更适合于求解大规模的 TSP 问题。

2.2.5 蚁群算法的收敛性研究

在蚁群优化算法的收敛性证明中，有人证明了一类蚁群算法的收敛性质。特别地，可以证明，在该类算法条件下，对于一个任意小的常量 ($\varepsilon > 0$) 和足够多的算法迭代次数 t 找到最优解的概率至少是 $P^*(t) \geq 1 - \varepsilon$ 而且当 t 趋向于无穷大时，此概率就趋向于 1。还可证明，当找到最优解之后，在有限的循环次数内，与最优解相关的信息素积累将超过任何其他的信息素积累。

还有人发展了一种以结构图为基础的、能够解决组合最优化问题的启发式蚁群算法，并给出了其收敛性证明。在该框架下，结构图被赋予当前所考察优化问题的实例，并合理借用路径的概念加以表达。计算表明，在一定的条件下，基于图的蚁群算法通过反复的迭代能够产生对于给定问题接近于最优的解。

另有论文讨论了蚁群优化 (ACO) 算法如何保证全局最优。同样，在所构建的基于图的蚁群系统中，分析了各蚁群优化算法变