



徐俊杰 著

元启发式优化算法：理论阐释与应用

Theoretical Interpretation and Application: Meta-heuristic Optimization Algorithm

Meta
-heuristic

中国科学技术大学出版社

◎ 安徽省高校优秀青年人才支持计划资助成果

元启发式优化算法：理论阐释与应用

Theoretical Interpretation and Application: Meta-heuristic Optimization Algorithm

徐俊杰 著



Meta
-heuristic

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

元启发式优化算法通过模拟自然现象为解决复杂问题提供了崭新的思路 and 手段。本书主要介绍两类元启发式优化算法:第一类是群体智能算法,包括蚁群优化和粒子群优化两种仿生算法;第二类是微正则退火算法,它借鉴物理学相关原理,改进了传统模拟退火机制。借助仿真手段,本书着重研究了上述元启发式优化算法的若干改进策略及应用,主要内容涉及元启发式优化算法的产生背景及相关概念,蚁群优化与粒子群优化的研究现状、基本算法及改进方法,微正则退火算法的原理、改进策略及应用实例,基于增强型参考位置的粒子群优化算法,基于共享适应值的小生境粒子群优化算法,两阶段粒子群优化算法等。

本书内容取材新颖,面向应用,通过翔实的仿真数据,介绍了各个算法的参数控制和运算过程,为读者利用该算法解决实际问题提供有益启示。本书可作为管理科学、控制科学、计算机科学等专业高年级本科生、研究生、教师和其他专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

元启发式优化算法:理论阐释与应用/徐俊杰著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015.5

ISBN 978-7-312-03654-5

I. 元… II. 徐… III. 启发式算法—研究 IV. O242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 073400 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 安徽省瑞隆印务有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 9

字数 166 千

版次 2015 年 5 月第 1 版

印次 2015 年 5 月第 1 次印刷

定价 28.00 元

前言

科学技术呈现出跨学科交叉和渗透特征,智能计算技术在工业控制和管理领域的应用日渐增多,逐步改变着人类的生产与生活方式。然而,目前电子计算机的运算能力并非无所不能,在求解那些具有不确定性、动态性、非线性或多态(Multi-modal)问题时常常不能满足需求,因此人们对于高效计算技术的探索从未停止。

近年来,元启发式优化算法得到了广泛关注,它们模拟自然现象(Nature-inspired),为解决复杂问题提供了新颖思路,其中研究最为透彻、应用最为普遍的当属遗传算法和模拟退火。本书结合笔者的研究经历,主要介绍两类元启发式优化算法:第一类是群体智能(Swarm Intelligence)优化算法,包括蚁群优化(Ant Colony Optimization)和粒子群优化(Particle Swarm Optimization),它们都是基于种群策略的仿生算法;第二类是微正则退火(Microcanonical Annealing)优化算法,它与传统模拟退火相似,都借鉴了物理学的退火原理。本书通过经典实例仿真,探讨了这两类元启发式优化算法的改进策略及应用效果。

本书包含九章内容。第1章介绍了研究背景和研究现状。第2章阐述了元启发式优化算法的相关理论和概念。第3章介绍了蚁群优化算法的提出背景、基本算法和改进形式,并对处理连续性问题、收敛性理论分析及其应用做了总结。第4章是关于粒子群优化的综述,以算法背景、参数控制及其改进为主,最后也讨论了粒子群优化的实际应用。第5章介绍了微正则退火的基本原理,提出了状态回溯、能量奖励及能量收缩三种改进策略,并且结合仿真结果讨论了这些策略的实施效果。该章还将微正则退火运用到移动通信系统中固定频率分配的问题上。仿真发现,该算法在频点资源紧张时明显优于模拟退火算法。第6章介绍了增强型参考位置的粒子群优化算法,这种改进策略在速度迭代公式中同时考虑邻居中最佳粒子以及种群中最佳粒子的吸引作用,相当于基本算法 Gbest 与 Lbest 的融合形式。第7章将基于共享适应值的小生境技术应用到粒子群优化中,仿照生态系统限制相似个体过分聚集。该章构建了固定邻居结构的 F-ShPSO 算法和动态选择邻居的 D-ShPSO 算法两种形式。仿真表明,F-ShPSO 算法的搜索成功率不低于 Lbest

算法,但迭代次数波动较小,且对邻居规模不敏感,而 D-ShPSO 算法的表现较差,说明动态邻居机制并不可行。第 8 章介绍了针对粒子群优化的两阶段实施策略,对比实验揭示,该策略能提高搜索到多态函数最优解的成功率,并且降低了基本算法中两项偏差权重的敏感度。最后对全书内容做了简要回顾,并指出了研究不足和值得关注的研究方向。

本书可作为管理工程、计算机应用、工业控制等专业的高年级本科生、研究生以及研究智能优化算法的科技工作者的参考书。由于作者水平有限,书中难免存在不足,恳请读者批评指正。

感谢北京邮电大学忻展红教授、梁雄健教授、舒华英教授、曾剑秋教授在笔者攻读学位期间给予的指导和帮助,感谢中国科学技术大学出版社对本书出版的支持。此外,本书获得了安徽省高校优秀青年人才支持计划的资助,在此表示衷心感谢。

徐俊杰

2015 年 3 月 5 日

目 录

前言	(i)
第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 国内外研究概况	(4)
1.3 本书的研究内容	(11)
第 2 章 元启发式算法的相关概念	(13)
2.1 最优化问题及其分类	(13)
2.2 局部最优与全局最优	(14)
2.3 计算复杂性	(15)
2.4 启发式算法	(18)
2.5 元启发式算法的优化模式	(22)
2.6 优化算法的评价	(28)
第 3 章 蚁群优化	(30)
3.1 生物背景	(30)
3.2 蚁群优化模型	(32)
3.3 基本算法:蚂蚁系统	(33)
3.4 其他算法	(39)
3.5 处理连续问题	(43)
3.6 收敛性分析	(43)
3.7 应用概述	(44)
3.8 小结	(48)
第 4 章 粒子群优化	(49)
4.1 生物背景	(49)
4.2 粒子群优化模型	(50)
4.3 基本算法	(51)
4.4 两种参数配置方式	(54)

4.5	受关注的若干改进	(55)
4.6	处理离散问题	(58)
4.7	应用概述	(63)
4.8	小结	(64)
第 5 章	微正则退火算法及其应用	(65)
5.1	微正则退火算法	(65)
5.2	TSP 实例仿真	(68)
5.3	三种改进策略	(74)
5.4	基于微正则退火的频率分配方法	(84)
5.5	小结	(89)
第 6 章	增强型参考位置的粒子群优化模型	(90)
6.1	模型描述	(90)
6.2	测试函数	(91)
6.3	确定性的参数配置	(92)
6.4	具有随机扰动的参数配置	(94)
6.5	小结	(97)
第 7 章	共享适应值的小生境粒子群优化	(98)
7.1	小生境在遗传算法中的应用	(98)
7.1.1	排挤小生境模型	(98)
7.2	小生境在粒子群优化中应用	(99)
7.3	ShPSO 模型	(101)
7.4	实验结果分析	(102)
7.5	小结	(105)
第 8 章	基于两阶段策略的粒子群优化	(106)
8.1	两阶段策略设计	(106)
8.2	实验设计	(108)
8.3	实验结果	(109)
8.4	小结	(112)
附录 1	TSP 实例的节点坐标	(115)
附录 2	核心源程序	(116)
参考文献		(124)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 优化算法的研究背景

没有人能够否认计算机的巨大作用,它可以称作是人类在 20 世纪最伟大的发明。计算机的应用已经遍及各行各业,譬如通信、产品研发与制造、交通运输、科学研究乃至日常生活等。计算机的长处可以归纳为两个方面:首先是高速计算能力,其次是大容量的存储能力。这两点使其能在人类自然智力无法胜任的诸多场合崭露头角。随着人工智能理论与技术不断发展,关于计算机与人谁“更聪明”的争论从未停止过。自信派认为,现在的计算机仍然是按照人类设计的“程序”运行,本质上逃脱不了被人类控制的局面,因此计算机智能不可能超越人类;危机派则认为,人类总有一天会设计出可以自主复制或自主设计程序的计算机,进而威胁人类自身的生存安全。目前这种争论还没有取得一致意见,但人们总体上都认为不可轻视计算机的未来。实际上,在人机象棋比赛中,超级计算机的复杂“思考”能力已经得到验证,好莱坞电影《黑客帝国》《终结者 3》《夺命手机》等更是描绘出了在智力、情感甚至外形上都与人类不相上下的未来计算机水平。

尽管对计算机应用前景充满着各种疑虑和担忧,但它终究只是一种潜在威胁,而且关注焦点还是计算机伦理问题。目前的计算智能远远没有达到人类不能控制的地步,现有计算机还存在着一些众所周知的缺陷。

首先,它要求待解决问题的结构、定义明确,对于那些具有随机、模糊或粗糙特性的不确定问题,目前计算机的解决能力还远远不够;其次,它要求问题结果是可预测的,如果问题与环境相关,而环境又无法全部预测,现有计算机同样会面临巨大的计算挑战;第三,它要求计算开销(时间、空间)必须处于可接受的

范围内,现实中某些问题虽然有明确的定义,但是也可能是难以计算的,比如下棋时所有规则都是已知的,但计算机处理这种问题时出现组合爆炸现象,对计算机的性能要求极高。

破解上述计算困境至少有三种思路:第一种是设计更好的计算机结构,如DNA计算机、光子计算机、量子计算机等,这一领域已经取得了一定研究进展,但是离实用化和普及化还有相当大的距离;第二种是尽力提高现有电子计算机的性能,特别是取得更快的计算速度,但是这种提升进展仍然不能满足需求;第三种是采用更加智能的计算方法,如人工神经网络、进化算法等,这是目前最易达到也是成本最小的应对途径。

本书将要讨论的优化算法也被称为元启发式(Meta-heuristic)算法。其中群体智能算法(包括蚁群优化和粒子群优化)源自研究人员对生物群体行为模式的观察,它们模拟生物群体之间的协作机制,被广泛应用到控制系统设计与优化领域。而微正则退火算法则是借鉴物理学的微正则蒙特卡罗仿真方法,也被成功应用于组合优化领域当中。

1.1.2 本书将要讨论的两类算法

1.1.2.1 群体智能优化算法

生物世界一直是人类汲取智慧的重要来源:根据对苍蝇嗅觉系统的研究,人们发明了高度灵敏的小型气体分析仪;根据对萤火虫发光机能的研究,人们仿造了可以发射冷光的照明工具。人类从千奇百怪的生物结构和机能中,总能模仿出各具特色的设计思想和工作原理,最终促成了仿生学的蓬勃发展。

过去十余年中,对社会性生物集体行为(Collective Behavior)的研究日益引起人们的兴趣。现实生物世界中,尽管单个生物个体并没有复杂的智慧,但是基于一定的规则,生物群体通过与个体及环境之间的交互,经常能产生系统科学中所称的分化或涌现现象。比如,单个蚂蚁在复杂多变的地理环境中显得非常渺小,但由许多蚂蚁所构成的群体,却能以很大的概率找到从蚂蚁巢穴到食物源之间的(近似)最短路径。

对于蚂蚁群体的这种集体探路行为,Dorigo、Colormi 和 Maniezzo 从 1991 年就开始探讨如何模拟这种机制,并提出利用蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)方法求解组合优化问题^[1-3]。无独有偶,Kennedy 与 Eberhart 对鸟群飞行觅食现象进行了研究,通过模仿“飞鸟”个体调整飞行方向的机制,他们于 1995 年提出了粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)技术^[4],该仿生算法在连续函数极值优化中崭露头角,是一种具有很强竞争力的随机全局优

化方法。

基于对蚁群优化的研究, Bonabeau、Dorigo 和 Theraulaz 三人在 1999 年合作出版了《群体智能:从自然到人工系统》一书^[5], 他们借鉴并拓展了元胞自动机理论中的“群体智能”(Swarm Intelligence)概念, 认为群体智能包括“任何受启发于社会昆虫群体或其他动物群体的设计算法或者分布式问题解决策略的努力”。但实际上, 此时他们所指的群体智能仅指蚁群优化。直到 2001 年, Kennedy、Eberhart 一起出版的《群体智能》, 才将他们提出的粒子群优化纳入了群体智能的范畴。

虽然现在研究人员所称的群体智能主要是指这两种优化技术, 但有理由相信自然界中一定还有其他生物群体具有这种天生的看似简单但却十分有效的协作机制。这种机制一旦被人类有效模仿, 必将丰富群体智能优化算法的含义。这方面的突破其实已经有所显现, 如李晓磊博士在 2002 年提出的鱼群算法^[6], 模仿了鱼群觅食、追尾、聚群三种行为模式, 在连续函数优化上表现不俗。又如 Paul G. Flikkema 等在 2005 年的群体智能研讨会(SIS)上, 提出生物膜(Biofilm)也具有群体智能的内涵^[7]。生物膜又称为细菌群体(Bacteria Community), 具有移动性、高效的能量管理、自治、自复制、健壮与快速响应等特点, 对于嵌入式系统的开发具有重要的借鉴与启示。

当然, 群体智能的研究价值不仅体现在优化上, 它对人类的智能系统开发方法也具有重要启示。目前, 国外科研机构利用群体智能技术开发机器人、传感器网络等都取得了令人振奋的成果。据称, 美国五角大楼曾资助一个称为虫群战略(Swarm Strategy)的群体智能研究项目, 潜在用途包括指挥协调无人飞行器 and 地面车辆的运动控制。美国某航空公司采用了基于蚁群思想的运输管理软件, 结果显著降低了企业成本。英国电信、美国通用汽车公司、法国液气公司等也都将这类新方法引入到了生产管理中。

国外已经有少数大学开设了相关课程^①, 国内的研究是从 20 世纪 90 年代末开始的。2011 年戴汝为院士在第六届全国人工智能联合会议上做了关于“群体智能的研究进展”的报告, 引起了国内很多学者的注意, 此后, 相关研究和工程应用开始增多。

1.1.2.2 微正则退火算法

微正则退火(Microcanonical Annealing, MA)的概念来自于 Creutz 在 1983

① <http://www.micro.caltech.edu/Courses/FE150/dungeon>。

年提出的微正则蒙特卡罗仿真方法^[8],该仿真方法基于微正则系综的概念^①,热系统与一只在状态空间中随机行走的“妖”(Demon)交换能量,在某个阶段内,热系统与“妖”的能量之和保持不变。在这一模型中,“妖”的移动引起系统能量的波动,并最终促使系统脱离亚稳态。

虽然微正则退火与模拟退火(基于正则系综的概念)都是模仿退火机制,但是两者具有明显的差异,在微正则退火中,状态拒绝/接受是一种确定性的方式,而在模拟退火中按照 Metropolis 准则,状态迁移以一种概率方式来决定。目前,国内外关于微正则退火算法的研究还比较少见。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 群体智能算法的研究概况

1.2.1.1 国外的研究

Dorigo 等在 1991 年提出蚁群优化的最初思想,在当时并没有得到太多重视,直到 1996 年他们系统阐述了蚁群优化的原理和方法后,才掀起了一个研究热潮,各种改进与应用(特别是通信网络路由优化)的研究文献大量出现。1998 年在比利时布鲁塞尔召开了第一届蚁群算法研讨会(ANTS'98),来自世界各地的 50 多位研究人员汇聚一堂讨论这种新的优化方法,后来该会议每两年举行一次。2000 年 Dorigo 等在《自然》上发表了研究综述,将蚁群算法推向了学术上最有影响力的杂志,许多著名的学术杂志都做过这个研究专题的特刊,与智能计算相关的会议中也增加了这种优化方法的主题。在粒子群优化方面,自 Eberhart 提出基本粒子群优化算法后,国外的研究主要集中在参数改进、拓扑改进、应用等方向。在本书后续章节中,将对两种群体智能优化方法做一个相对全面的综述。

① 系综是统计物理学中的一个假想的概念,表示由大量系统所组成的集合。系综做了两点假设:宏观量是相应微观量的时间平均,而时间平均等价于系统平均;平衡孤立系统的一切可达微观态出现的概率相等。当系统达到宏观平衡态时,宏观性质不随时间变化,相应的系综是稳定系综。根据不同的宏观条件,将稳定系综分为三种类型:由孤立系统组成的微正则系综、由恒温封闭系统组成的正则系综和由开放系统组成的巨正则系综。优化领域的模拟退火算法是建立在正则系综理论之上的。

1.2.1.2 国内的研究

截至2014年9月底,在中国学术期刊网上检索“蚁群算法”可获得9 000余篇相关文献,检索“粒子群优化”有11 000余篇相关文献,研究范围覆盖了算法改进、分析和应用三个方面。

就期刊文献来说,国内关于蚁群算法的最早研究是东北大学张纪会发表在《系统工程理论与实践》上的论文^①,其他相关研究还包括:东北大学张纪会、吴庆洪等提出的自适应蚁群算法^[9]、结合了变异与交换的改进算法^[10];清华大学覃刚力等提出的自适应调整信息素的蚁群算法^[11];重庆大学郝晋等提出的求解TSP问题的随机扰动蚁群算法^[12];扬州大学陈峻等提出的基于分布均匀度的自适应蚁群算法^[13];中科院计算所吴斌等首先在蚁群算法的基础上提出的相遇算法,提高了蚂蚁一次周游的质量,然后将其与采用并行策略的分段算法相结合,提出一种基于蚁群算法的TSP问题分段求解算法^[14];上海大学马良提出的度限制最小树蚂蚁算法^[15];福州大学林锦等提出的解凸整数规划问题的蚁群算法和求解连续函数优化问题的蚁群算法^[16];上海理工大学高玮将蚁群应用到铜群施工顺序优化问题^[17];王志刚将其应用到配电网网架优化问题^[18];孙新宇将其应用到混流装配的调度问题^[19];张素兵将其应用到QoS路由问题^[20];丁亚平将其应用到化学计量方面的问题^[21];侯云鹤将其应用到电力系统经济负荷的分配问题^[22];庄昌文等将其应用到VLSI开关盒布线问题^[23];中科院自动化研究所周登勇、戴汝为甚至开发了基于多主体的仿真工具系统COMPLEXITY^[24];王颖等通过自适应地改变蚁群算法中的挥发系数,提出一种自适应的蚁群算法^[25]。

国内关于粒子群优化的较早研究^②是复旦大学徐海发表在《计算机工程与应用》上的论文^[26],他提出了一种基于改进粒子群游优化的模糊逻辑系统自学习算法,通过模糊辨识器的计算机模拟证明了改进算法的有效性。其他相关研究还包括:焦作工学院的夏永明探讨了粒子群优化算法在直线感应电机优化设计中的应用^[27];东北大学的董颖提出了一种求解非线性规划问题的混合粒子群优化算法,设计了约束适应度优先排序处理约束条件的方法,并通过动态邻域算子和可变惯性权重进行联合演化以求得全局最优解^[28];吉林大学的黄岚等通过引入交换子和交换序的概念,构造一种特殊的粒子群优化算法,并用于求解旅行商问题^[29];河南师范大学的王岁花等提出了一种基于粒子群优化的

① 此说法来自段海滨博士的专著《蚁群算法原理及其应用》。

② 这个说法是指在CNKI上检索“粒子群优化”“微粒群优化”出现的最早论文。

BP 网络学习算法^[30];南京理工大学的高尚等提出了求解指派问题的交叉粒子群优化算法,并用实例仿真证实了其有效性^[31];兰州大学的吕振肃等提出了一种自适应变异粒子群优化改进算法,并对经典函数做了数值仿真^[32];武汉工业学院的李智等研究了粒子群在农业工程优化中的应用,通过对两个实例进行仿真展现了它的应用价值^[33];吉林大学的张利彪等提出了基于粒子群算法求解多目标优化问题,对全局极值和个体极值的选择方式做了相应的改进^[34];上海交通大学的刘靖明等提出一种基于粒子群的 k 均值聚类算法,并将此算法与现有的基于遗传算法的 k 均值聚类算法进行比较,从理论分析和实验两方面证明了它的优势^[35];东北大学的秦绪伟等提出一种求解整车物流网络规划问题的混合粒子群算法,用以搜索物流网络可行结构^[36]。

就学位论文来说,越来越多的硕士、博士论文都在讨论或利用群体智能技术。中国科学院计算技术研究所吴斌博士的学位论文《群体智能的研究及其在知识发现中的应用》系统介绍了蚁群优化算法^[37],提出了几种新的蚁群改进算法和它在数据挖掘中的应用。该论文的研究工作主要包括如下几个方面:(1)提出了一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法,从两个方面对基本蚁群算法进行了改进,提高蚂蚁每一次周游的质量,并将减少循环次数与并行策略相结合。论文称这一改进算法能够改善基本蚁群算法处理大规模 TSP 问题的性能。(2)基于群体智能的分工协作模型研究,提出了一种用于多主体系统协调的记忆合同网算法——MCNP。在记忆合同网算法中,管理主体通过记忆强度选取承包商主体,直接任务指派,减少了合同网算法的通信量。仿真表明在主体数目和任务集增大的情况下,记忆合同网算法明显提高了合同网算法的综合性能。(3)基于群体智能的聚类模型研究,提出了一种基于群体智能的聚类算法 CSI,论文中提出群体相似系数和概率转换函数等概念,给出了渐变参数的学习模型和简单的概率转换函数;并将 CSI 算法与 k 均值算法相结合,提出一种基于群体智能的混合聚类算法 CSIM。该论文还分析了群体智能聚类算法内在并行性,提出了一种采用并行策略的基于群体智能的聚类算法。(4)提出了一种基于群体智能的客户行为分析算法,应用到了客户关系管理中的客户行为聚类分析中。据称可以找到其他聚类算法未能找出的有特点的客户群体。除此之外,他也将模型应用于语义索引系统的概念聚类,提出了一种增量式群体智能混合文本聚类算法。论文中称这一聚类算法在准确性和实用性方面都取得了令人满意的结果。

电子科技大学李智在其博士学位论文《基于蚂蚁算法的时序电路测试生成研究》^[38]中,对基于蚂蚁算法的时序电路测试矢量生成方法作了系统的研究。该文是国内较早的基于群体智能优化算法的博士学位论文。

安徽大学程军盛在其硕士学位论文《仿生智能计算》^[39]中指出,当前的群体智能研究多是基于行为选择理论,将群体作为多智能体系统,每个智能体都预先指定了行为规则,把智能体群体放入环境中后,它们能感知外界环境,并能与环境及其他个体间产生交互,根据自身状态与具体环境选择一个合适的行为规则。该论文中将群体智能的研究领域主要分成三个方面,分别是蚂蚁分拣行为的计算机仿真、蚁群优化、粒子群优化。程军盛提出了一种新的研究思路,即从进化的角度出发,提出了一个利用随机连接的人工神经网络来描述群体智能的数学模型,并利用该模型仿真了蚂蚁筑巢行为和蜜蜂筑巢行为。

西安交通大学李有梅在其博士学位论文《仿生优化算法研究及其应用》中将离散神经网络算法与蚁群优化相结合^[40],提出了一种混合启发式算法,并利用它求解最大独立集问题。此混合算法降低了基本蚁群优化算法的计算开销,同时也保证了全局优化能力。该论文中的仿真结果表明,此算法在全局优化能力上超过了遗传算法与离散 Hopfield 神经网络。

吉林大学郑岩在其博士学位论文《数据聚类及其应用研究》中提出了一种结合群体智能聚类与 k 均值算法的两阶段聚类算法^[41],仿真结果表明这种方法能够发现更细致的分类,并能发现孤立点。群体智能聚类的最早研究是 Deneubourg 等提出的基本模型(BM),该模型模拟了蚁群扫穴的过程。后来 Gutowitz 提出的空间熵的概念用于跟踪聚类的动态过程、Lumer 与 Faieta 在 BM 基础上提出的 LF 算法等。基于群体智能的聚类基本思想是,将待聚类的对象随机分布于一个环境当中,个体蚂蚁测量所遇到的某个对象在局部环境中的群体相似度,进而通过概率转换函数得到拾起这个对象的概率,并采取相应的操作行为。同时逐渐调整群体相似系数,经过蚁群、环境之间的相互作用,最终形成若干聚类中心,最后通过基于密度的递归算法收集聚类结果。郑岩在其论文中提出的两阶段的混合方法中,前一阶段是基于群体智能聚类,后一阶段使用 k 均值技术对所得的聚类结果进行后处理,这种混合聚类算法兼顾了群体智能自组织与 k 均值快速收敛的特点。

上海大学卜天明的硕士学位论文《蚁群优化算法若干问题研究》主要研究了两点^[42]:首先是应用蚁群优化求解最大团问题的 ANCLQ 算法;其次提出了一种二进制编码的蚁群优化算法 BBACO,并给出了只有当蒸发因子大于或等于 1 时才能收敛于全局最优的收敛性分析,但是这一收敛证明过程值得推敲。

重庆大学胡小兵的博士学位论文《蚁群优化原理、理论及其应用研究》中对蚁群优化做了一个综述^[43],特别介绍了关于收敛性方面的主要研究成果。该论文的主要创新点在于:(1)提出了两种改进算法,一种被称为自适应的蚁群算法(AACA),所做的改进是根据平均的节点分支数动态调整转移概念;另一

种改进算法是基于混合行为的蚁群算法,核心思想是将蚂蚁分成了四组,并为各组蚂蚁定义了一种不同的状态转移规则,然后所有蚂蚁都被投放到搜索空间中进行搜索。运用该策略时,各组蚂蚁数量的配比是一个可调的参数。(2) 针对带聚类特征的 TSP 问题,提出了一种并行 ACO 算法,该并行算法实质上是分割问题,然后合并子问题构成整体解。(3) 研究了蚁群优化在若干组合优化问题中的应用,包括 k -TSP 问题和 0-1 背包问题。(4) 研究了蚁群优化在机器人路径规划中的应用,并提出了求解迷宫问题的 ACO 算法以及机器人在三维空间中的路径规划算法。

同济大学李炳宇的博士论文《群体智能模型算法的研究与应用》研究了蚁群算法模型和粒子群算法模型^[44],并将其应用到计算机网络系统可靠性的最优配置与磁流变阻尼器动力学的模型建立中。他的主要研究成果是:(1) 提出了一种新的混合蚁群算法。该算法由小窗口蚁群算法、基于模式的蚁群算法、基于一致分布佳点集的蚁群算法三部分组成。其思路是通过缩减解空间和改善启发式搜索方法,来解决蚁群算法在处理大规模问题时出现的运算时间长、求解质量差等问题。(2) 提出了称为 SMPSO 和 PSODE 的两种混合粒子群算法。前者引入单纯形法(SM),用以解决连续空间高维无约束优化问题,在保证算法全局搜索的同时加快了算法的收敛速度。后者将粒子群算法和差分进化算法(DEA)相结合,用以解决连续空间约束优化问题,以改善单一搜索机制易陷入局部最小的问题,并使用一种新的边界处理方法,克服了传统算法在处理复杂边界问题时的多种不足。据称,这两种算法对问题范围不敏感,鲁棒性强,在解决工程实际模型的数值实验中表现出了较强的计算能力和良好的效果。(3) 提出了基于蚁群寻食模型与粒子群算法模型的两种并行算法。前者将蚁群算法各种种群分散运算产生模式,集中学习得到模式,改变问题计算粒度间接缩小问题空间,使该并行算法达到线性加速比,并得到了 CHN144 问题目前的最好解。后者引入一种更能准确反映生物群落运行机制的多种群层级结构模型,该模型采用新的竞争和筛选机制,保持了种群的多样性并且避免了算法的过早收敛,而且该算法结构能更好地分配和平衡探索(范围)与开发(精度)的关系,并得到了 50 维 Keane's Bump 问题目前的最好解。(4) 改进算法的应用研究,利用新的混合蚁群算法求解计算机网络系统可靠性最优配置问题,另外也提出了基于群体智能的径向基神经网络学习算法,并应用其建立磁流变阻尼器阻尼特性预测模型。

哈尔滨工程大学陈红洲在其硕士学位论文《群体智能若干算法研究》中特别分析了微粒群算法的全局与局部搜索能力的缺点,以及各种改进策略^[45]。该论文将感觉模型引入微粒群的开发部分中,提出了一种具有感觉特征的微粒

群算法,以加强局部搜索的能力。通过与遗传算法、基本的微粒群算法、耗散式微粒群算法的计算结果做对比,验证了这种具有感觉的微粒群算法的开发能力、全局局部搜索协调的能力。

哈尔滨工业大学彭宇在其博士学位论文《群智能优化算法及理论研究》中阐述并分析了两种群智能优化算法的研究现状、发展趋势、存在的问题^[46]。该论文的研究成果包括:(1)采用数理统计的方差分析和实验评估的方法,论证了微粒群算法中主要参数对算法整体性能的影响,提出了相关参数的选择原则和修正方法。(2)针对微粒群算法初始参数依赖性强和算法搜索能力弱的问题,提出了以微粒群算法和模拟退火算法为基础的混合型群智能优化方法,仿真证明该混合优化方法能够提高种群的多样性,进而提高了优化解的质量;作者还提出了通过调整温度衰减系数改善此混合算法运行效率的方法。(3)针对蚁群算法计算效率低的缺陷,提出了层次化蚁群数据聚类算法,通过阶段性的数据凝聚和压缩搜索空间提高求解效率和聚类质量。

北京科技大学邵巍在其硕士学位论文《加强信息利用率的改进蚁群算法:解决路由选择优化问题》中提出了一种解决路由选择优化问题的改进蚁群算法^[47],该算法建立了一种 $n \times n$ 的拓扑矩阵,每个矩阵元素又记录了对应点之间的信息矩阵,该矩阵指导蚂蚁选择合适的下一跳。由于系统中多只蚂蚁都可能经过同一个节点,这种方法使蚂蚁遗留的信息得到了多次的应用,因此比基本的蚁群优化算法提高了性能。这种方法本质是用空间换取时间代价,尽管作者也提出了一些压缩信息矩阵的方法,但是该改进方式能够适应节点数量较大的情形还难以估计;同时,每个节点只掌握了局部的链接变动情况,但是没有机制处理链路远端节点失效所带来的选路影响,即没有提出一个可行的机制维护信息矩阵的有效性,这对于网络路由选择问题来说是必须要解决的。

华中科技大学的高海兵在硕士学位论文《粒子群优化算法及其若干工程应用研究》中介绍了粒子群优化算法的工程应用^[48],包括神经网络训练、切削参数优化、旅行商问题及作业车间调度问题。作者在论文中提出了基于粒子群优化的神经网络训练算法——SPSO,该算法在训练神经网络权值的同时优化其连接结构,删除冗余连接,部分消除了冗余参数及相应冗余连接结构对神经网络性能的影响;在讨论切削参数优化中的应用时,作者提出了适合粒子群优化机理的约束处理,并通过与直接搜索算法的混合,加强了粒子群优化算法的局部搜索能力;此外,作者还提出了一种广义粒子群优化模型用于离散优化环境。该论文作者首先将传统粒子群的迭代方程组进行合并,只以一个状态(X 变量)更新方程进行展现,然后指出可以不局限于实数编码的思维去理解原先速度迭代公式中的两个差项(即粒子与自身、全局或局域环境下的位置差异),并给出

了使用遗传算子来实施这一广义粒子群优化算法的操作步骤。此时两个差项可以通过个体与两个最优记忆之间的交叉算子获得,而惯性权重可以通过变异算子模拟得到。广义粒子群算法对基本粒子群优化更新公式的理解具有一定的创新性,是为数不多的讨论粒子群优化求解离散问题的研究,也是这篇论文最大的特色之处;作者受对类电磁机制(EM)算法缺陷的研究启发,提出了一种新的基于信息共享机制的方法:种群保留大小为 K 的记忆库(如种群数量的 20% 左右),这个记忆库存放整个种群的前 K 个最好解,而且这 K 个最好记忆不重复,每个粒子更新自己的状态时,除自身极值的影响外,不再考虑全局或局部极值的影响,而是从这个记忆库中随机选择。这种方法能够有效避免局部极值点对局部区域的影响,因为从记忆库中选择具有随机性,而不是确定的局部群体中选择。该论文以作业车间调度问题验证了该信息共享机制的有效性。这种方法的实质仍然是尽量减小局部群体或整个群体被某个局部极值点吸引的概率,其缺陷在于要保证 K 个极值点不重复所带来的额外计算开销,因为 K 不能太小,否则记忆库就与它的初衷背道而驰了。

武汉理工大学孙骏的硕士论文《基于蚁群优化算法的 TSP 问题研究》主要希望能够提高 ACS 算法的全局收敛性^[49],为此提出了改进策略,并对蚁群算法中的三个参数的配置进行了讨论。受 MMAS 算法、心理学关于感知的阀限原理等启发,该论文提出了一种改进 ACS 算法,此算法中增加了弧最小信息素强度的设置。该论文中的仿真结果显示,这种改进与基本 ACS 算法相比提高了全局收敛性能。

同济大学康琦在其硕士学位论文《微粒群优化算法的研究与应用》^[50]中对粒子群优化算法及应用做了一个详细的综述,然后提出了称为多元最优信息规划的粒子群优化算法(MOPPSO)。该算法的核心思想是将搜索空间分区,每一轮迭代中,按照最优适应值选取前 M 个粒子的重心取代传统算法中单个的全局指导(以全局型算法为例),同时粒子速度限界值为一个动态调整的变量。在此基础上,作者还引入了模糊控制方法,介绍了两种最优信息的模糊动态规划引导模式。该论文还提出了分组延迟通信传播模式算法 GBMPSO,将粒子群预先分组,组间最优信息采用分层(其实是逐步扩大的方式)传播的方式,直至最终能感知到全局最优信息的改进算法。该论文最后介绍了一个针对半导体封装测试生产线工序参数优化的具体应用。

此外,国内现已出版若干群体智能研究专著,大多数都来源于硕士、博士学位论文,主要内容基本是汇总了国内外的研究文献。曾建潮教授于 2004 年出版了《微粒群算法》^[51],它是国内第一本粒子群算法专著。该书介绍了基本粒子群算法、若干改进算法、实验中的参数选择问题、若干收敛性研究论文、人工