

粒子群优化算法

李 丽 牛 奔 著



冶 金 工 业 出 版 社
Metallurgical Industry Press

粒子群优化算法

李丽 牛奔 著

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 简 介

本书研究了群体智能典型实现的算法之一——粒子群优化算法。其针对传统粒子群优化算法存在的缺点,给出其改进方法或提出新模型,使之更为有效可靠;另外,介绍了所提出的新模型、新算法在实际工程领域中的应用,拓展了粒子群算法的应用领域。

本书在介绍了粒子群优化算法基本原理、基本粒子群算法的基础上,阐述了粒子群算法的实现技术,基于参数改进的粒子群算法、混合粒子群算法、生物启发式粒子群算法,重点研究了粒子群算法在各类现实工程问题中的应用情况。

本书适合运筹与管理、人工智能、计算数学、计算机科学、系统科学、自动化等专业的师生参阅,亦可供从事计算智能研究与应用的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒子群优化算法/李丽,牛奔著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-5024-5039-7

I. 粒… II. ①李…②牛… III. 电子计算机—算法理论—研究 IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 164067 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 侯 珺 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5039-7

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 10 月第 1 版,2009 年 10 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;5.125 印张;135 千字;154 页;1-1000 册

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

20 世纪 90 年代生物学家及计算机专家通过对社会型生物的观察和研究, 创立了以模拟群体生物行为为特征的群体智能研究领域。所谓的群体智能是指众多行为简单的个体在相互作用过程中涌现产生的整体智能行为。

群体智能作为一个新兴领域, 尽管只有十几年的发展, 却已引起众多学科领域研究人员的关注, 目前已经成为人工智能、经济、社会、生物等交叉学科的热点和前沿领域。基于群体智能思想提出的各类算法已在传统 NP 问题求解及诸多实际应用领域中展现出其优异的性能和巨大的发展潜力。

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是群体智能典型实现的算法之一, 可简称为 PSO 算法或粒子群算法。本书是我们对 PSO 算法研究的总结。全书共分 5 章, 第 1 章介绍了 PSO 算法研究的相关背景知识及展望, 如生物启发式计算、群体智能等; 第 2 章讨论了 PSO 算法的基本原理及实现技术等; 第 3 章给出了 PSO 算法中参数的分析; 第 4 章介绍了几种典型的改进 PSO 算法; 第 5 章研究了一些 PSO 算法的实际应用问题。

本书的出版得到了深圳大学学术出版基金、深圳大学科研基金资助项目 (801-000021)、深港创新圈项目 (SG 2008 10220137A)、广东省自然科学基金博士启动 (9451806001002294) 等项目资助。在撰写书稿的过程中, 谭立静、薛冰、庄晓芬为本书的资料搜集、校对和

排版做了大量的工作。还要感谢深圳大学管理学院智能管理课题组所有成员，尤其是吴雨、楚湘华、詹萌、李淑海等研究生给予的帮忙。

在本书的撰写过程中，作者参考了国内外相关专家的研究成果，在此对涉及的专家和研究人員表示衷心的感谢。

目前国内在粒子群优化算法方面的书籍还十分匮乏，我们希望本书能够满足大家的需求，但是由于时间仓促，加之作者水平有限，书中不妥和疏漏之处，还请各位专家、学者和读者不吝指正。

作者
2009年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 相关背景	1
1.2 生物启发式计算	3
1.2.1 遗传算法	3
1.2.2 神经计算	4
1.2.3 模糊系统	5
1.2.4 其他生物启发式计算方法	6
1.3 群体智能	8
1.3.1 群体智能简介	8
1.3.2 群体智能的基本特性	10
1.4 群体智能算法及其研究现状	13
1.4.1 蚂蚁算法	13
1.4.2 粒子群优化算法	17
1.4.3 群体智能算法应用研究现状	18
1.5 展望	20
参考文献	21
2 粒子群算法	25
2.1 引言	25
2.2 粒子群算法概述	25
2.2.1 粒子群算法的起源	25
2.2.2 原始粒子群算法	27
2.2.3 标准粒子群算法	28
2.3 标准测试函数	29
2.4 粒子群算法的实现	31
参考文献	33

3 粒子群算法参数分析	34
3.1 引言.....	34
3.2 惯性权重分析.....	34
3.2.1 线性惯性权重策略.....	35
3.2.2 非线性惯性权重策略.....	36
3.2.3 其他策略.....	59
3.3 学习因子分析.....	61
3.4 其他参数分析.....	64
参考文献	68
4 改进粒子群算法	70
4.1 粒子群算法改进研究综述.....	70
4.1.1 参数改进.....	70
4.1.2 拓扑结构的改进.....	71
4.1.3 混合策略.....	72
4.1.4 基于生物行为的改进.....	73
4.2 基于差分进化的一种新型混合粒子群算法.....	74
4.2.1 差分进化算法.....	76
4.2.2 基于差分进化的混合粒子群算法.....	76
4.2.3 试验设置与测试函数.....	80
4.2.4 试验结果.....	81
4.3 基于模拟退火思想的粒子群算法.....	85
4.3.1 概述.....	85
4.3.2 模拟退火算法.....	85
4.3.3 基于模拟退化思想的粒子群混合算法.....	87
4.3.4 实验设置与测试函数.....	89
4.3.5 实验结果.....	90
4.4 基于细菌趋化的改进粒子群算法.....	95
4.4.1 PSOBC 算法	96

4.4.2	PSOBC 算法实现步骤	98
4.4.3	实验与结果分析	99
	参考文献	102
5	粒子群算法的应用	108
5.1	基于粒子群算法的神经网络训练	108
5.1.1	问题背景	108
5.1.2	基于 PSO 的 BP 网络训练过程	109
5.1.3	实例研究	111
5.2	基于粒子群算法的 PID 参数整定	117
5.2.1	基于 PSO 的 PID 参数自整定方法	118
5.2.2	算法流程	120
5.2.3	算法实例	120
5.3	基于多群体协同粒子群算法的物流配送中心选址	123
5.3.1	引言	123
5.3.2	物流配送中心选址的数学模型	124
5.3.3	多群体协同粒子群算法	126
5.3.4	基于多群体协同粒子群算法的物流配送中心选址	128
5.4	基于多群体协同粒子群算法的模糊系统设计	134
5.4.1	基于 MCPSO 的模糊系统设计	134
5.4.2	T-S 模糊模型	135
5.4.3	基于 MCPSO 的 T-S 模糊系统优化设计	136
5.4.4	实例研究	138
5.5	基于多群体协同粒子群算法的 RFID 读写器网络规划	145
5.5.1	引言	145
5.5.2	RFID 读写器网络规划建模	145
5.5.3	基于 MCPSO 算法的 RFID 读写器网络规划	146
5.5.4	仿真实验	148
	参考文献	151

1 绪 论

大自然给人以许多启迪,人们从生物界的各种自然现象或过程中获得灵感,提出了许多用以解决复杂优化问题的新方法,这些方法因其高效的优化性能、对问题依赖性较小等优点,受到各领域的广泛关注和应用。人们将这种启发应用于生物行为的计算方法称之为生物启发式计算。在最近几十年中应用较为成功的生物启发式计算方法有遗传算法、神经计算、模糊系统等。随着人工智能的进一步发展和人工生命的兴起,出现了一类模拟社会型生物行为的启发式算法——群体智能优化。其中较具代表性的有蚂蚁算法和 PSO 算法。本章首先给出了关于 PSO 算法研究的背景并对已有的生物启发式计算方法进行简单的回顾,然后引出目前生物启发式计算领域研究热点——群体智能,对群体智能进行概述,并从理论和应用两个角度对群体智能算法进行综述。

1.1 相关背景

在实际生活中,人们经常会遇到一个问题有多个解决方案的情况,如何在满足约束条件下选择一个最优的方案,这就是最优化问题。最优化问题是一门应用十分广泛的学科,长期以来,人们对于最优化问题进行了大量的研究与探索。17 世纪英国伟大的科学家牛顿发明了微积分;拉格朗日提出了拉格朗日乘数法;1847 年法国数学家 A. L. Cauchy 为解决无约束优化问题提出了最速下降法;1939 年苏联数学家 L. Kantorovich 提出了解决下料问题和运输问题这两种线性规划问题的求解方法;1947 年, G. Dantzig 提出了著名的求解线性规划的单纯形方法。研究上述方法的目的均在于探索优化算法。

这些经典的优化方法大多数是针对某些特定问题的,对搜索

空间的要求比较严格,求解问题的依赖性较高,有的还需要被优化问题的导数信息。随着科学和技术不断发展,优化问题也变得异常复杂,有的问题根本无法用函数表达,对于这类问题,采用传统方法,很难获得满意的结果。因此需要进一步的研究和探索新的优化思想和优化方法。

人们从自然界的生物系统中得到启示,提出了一系列的生物启发式计算方法。如模拟人脑组织结构与信息处理的人工神经网络,模拟生物种群进化和自然选择的遗传算法,模拟人类对模糊不确定信息处理的模糊系统,模拟生物免疫系统学习和认知的人工免疫系统等。目前,这些智能优化方法在科学、工程、经济等领域得到了广泛的应用并取得了令人鼓舞的成就。

近年来,人们通过对社会型生物群体行为的模拟提出了一类新型的生物启发式计算方法——群体智能算法。自提出以来,已引起了多个学科领域研究人员的关注,成为人工智能以及经济、社会、生物等交叉学科的热点和前沿领域。群体智能用群体优势,在没有集中控制,不提供全局模型的前提下,为寻找复杂问题解决方案提供了新的思路。群体智能领域具有代表性的两种算法为:启发于蚂蚁寻径的蚂蚁算法,鸟类觅食行为的 PSO 算法。

本书研究的群体智能领域的典型算法之一——PSO 算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是由 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 于 1995 首次提出的,同遗传算法类似,是一种基于群体的优化技术,通过一组初始化的群体在搜索空间并行搜索。其次,它无须梯度信息,对问题的依赖性较小。与遗传算法等进化算法不同的是它没有选择、复制、变异等进化操作,而是通过群体中个体与个体间的竞争与协作实现种群的进化。由于 PSO 算法的概念简单,程序易实现,需要调整的参数较少,因此从 PSO 算法诞生之日起就引起了国内外学者的关注,并掀起了研究热潮,在诸多领域得到了成功的应用。

由于 PSO 算法历史尚短, 算法的理论基础还比较薄弱, 其应用范围还需要进一步的拓展。本书正是在这样一个背景下开展了对 PSO 算法的理论与应用方面的研究。

1.2 生物启发式计算

1.2.1 遗传算法

遗传算法由美国 Michigan 大学的 J. Holland 教授于 1975 年提出的, 其思想来源于达尔文的自然进化论和孟德尔·摩根的群体遗传学说。

遗传算法是一种随机优化算法, 但它不是简单的随机比较搜索, 它是通过对染色体的评价和对染色体中的基因作用, 有效利用已有的信息来指导下一代的染色体向更优秀状态的进化。遗传算法求解问题时, 将问题的求解过程视为染色体适者生存的过程, 通过染色体一代一代的不断进化 (包括选择、交叉、变异等操作) 实现对环境的适应, 保留优良个体, 淘汰劣质个体, 最终收敛到“最适应环境”的个体, 从而找到问题的最优解或满意解。

标准遗传算法的主要步骤可以描述如下:

- (1) 随机产生一组初始个体构成初始种群;
- (2) 评价每一个个体的适应度值;
- (3) 判断算法的收敛准则是否满足, 若满足则输出结果, 否则执行如下操作;
- (4) 根据适应值大小以一定方式执行选择操作;
- (5) 按交叉概率执行交叉操作;
- (6) 按变异概率执行变异操作;
- (7) 评价每个个体的适应值。

在上述算法中, 适应度值用来判断染色体的好坏, 它的定义一般与具体求解问题有关。这也是个体唯一需要获取的信息。选择操作的目的是为了从当前群体中选出优良的个体, 使它们有机

会作为父代为下一代繁殖子孙,进行选择的原则是适应性强的个体为下一代贡献一个或多个后代的概率大。交叉操作是遗传算法中最主要的遗传操作。通过交换操作可以得到新一代个体,新个体继承了其父辈个体有效模式,有助于产生优良个体。变异操作通过随机改变个体中某些基因而产生新个体,有助于增加种群的多样性,避免早熟收敛。

由于遗传算法的自组织、自适应、自学习等智能特性及高效的种群并行处理能力,遗传算法已被广泛地应用于自动控制、规划设计、组合优化、图像处理、信号处理、人工生命、机器人学、电力系统、数据挖掘等各种领域的复杂寻优问题求解。

1.2.2 神经计算

受生物神经系统的启发,人们提出了一种新型的非算法信息处理方法——人工神经网络。该网络可以模拟大脑的某些机理与机制,从神经元的基本功能出发,逐步从简单到复杂组成网络。它的组织能够模拟生物神经系统对真实世界物体所作出的交互反应。

1943年,心理学家 W. S. McCulloch 和数学家 W. Pitts 提出的神经元二元阈值单元 (binary threshold unit),即著名的 M-P 模型。该模型的基本思想是:神经细胞的工作方式是兴奋或者是抑制。基于这个思想,W. S. McCulloch 和 W. Pitts 在神经元模型中引入了硬极限函数。M-P 模型是一种静态的模型,结构固定,权值无法调节,缺乏学习能力。针对这一问题,1949年神经生物学家 D. Hebb 提出了著名的 Hebb 学习规则:当两个神经元同时兴奋或同时抑制时,它们之间的连接强度增加。

随后,1958年,F. Rosenblatt 提出了感知器 (perceptron) 的概念,它由阈值神经元组成,试图模拟动物和人脑的感知及学习能力。1986年 D. E. Rumelhart 和 J. L. McClelland 等提出了前向反

馈神经网络的 BP 学习算法，它成为当今使用最广泛的前向神经网络的学习方法之一。自此越来越多的学者开始关注神经网络的研究，在 20 世纪 80 年代中期得到了飞速的发展。

目前神经计算已成为一门日趋成熟的学科，而且渗透到几乎所有的工程应用领域。当前神经计算的研究主要集中在：神经计算的理论基础、神经网络集成、混合学习方法、脉冲神经网络（spiking neural networks）、循环神经网络（recurrent neural networks）、模糊神经网络、神经网络与遗传算法及人工生命的结合、神经网络的并行及硬件实现容错神经网络研究等。

1.2.3 模糊系统

模糊计算是对人类思维方式，即对模糊性概念和推理机制的模拟。美国加州大学 L. A. Zadeh 博士于 1965 年发表了关于模糊集的论文，首次提出了表达事物模糊性的重要概念——隶属函数，开创了模糊计算这一新的研究领域。模糊数学理论把元素对集的隶属度从原来的非 0 即 1 推广到可取区间 $[0, 1]$ 的任何值，从而可以用隶属函数表示模糊集。模糊集理论构成了模糊计算系统的基础。1974 年，M. Mamdani 在蒸汽发动机上成功地运用了模糊控制，开始了模糊控制的应用阶段。模糊系统在此得到了极大的发展，并且得到广泛的应用。

模糊集合是一种没有精确边界的非确定性集合，正如 L. A. Zadeh 在其名为 *Fuzzy Sets* 的开创性文章中指出，这种非精确定义的集合或类别“在人类的思考中起重要的作用，特别是在模式识别、信息通信和抽象领域中”。

模糊推理系统是建立在模糊集合理论、模糊 if-then 规则和模糊推理等概念基础上的先进的计算框架。模糊推理系统的基本结构由三个重要部件组成：一个规则库，包含一系列模糊规则；一个数据库，定义模糊规则中用到的隶属度函数（Membership Functions, MF）；以及一个推理机制，按照规则和所给事实执行

推理过程求得合理的输出或结论。模糊推理系统在很多场合需要得到精确的输出，特别是用作控制器的情况，这时模糊推理系统实现从输入到输出之间的非线性映射。这个映射是由一组模糊规则基来完成的，其中，每个规则描述映射的局部行为。特别地，规则的前件定义了输入空间中的模糊区域，而后件规定了模糊区域中的输出。

模糊推理系统成为解决众多复杂性问题的有力工具，如何获得一组最优模糊规则，是建立模糊模型的核心问题，也是最难以解决的问题。为此，最近十几年来，学者们提出各种不同的模糊建模方法，并在多个领域获得了成功应用。

1.2.4 其他生物启发式计算方法

其他的生物启发式计算方法还包括：进化规划算法、进化编程、人工免疫系统、DNA 计算和膜计算等，下面分别介绍。

1.2.4.1 进化规划

20 世纪 60 年代中期，借鉴自然界生物进化的思想，美国学者 L. J. Fogel 提出了一种随机优化方法。他认为智能行为必须包括预测环境的能力，以及在一定目标指导下对环境作出合理响应的能力。他提出采用“有限字符集上的符号序列”表示模拟环境，采用有限状态机表示智能系统。进化规划根据正确高效能的符号数来度量适应值，群体中的每一个个体都通过变异产生一个子代个体，然后在父代个体和子代个体的并集中选择最好的一半作为下一代父体。

1966 年，D. B. Fogel 出版了基于模拟进化的人工智能，系统阐述了进化规划的思想。1972 年，在美国举行了进化规划第一届年会，此后，迅速引起大批研究人员和工程技术人员的重视，并开始将其应用于实际。

1.2.4.2 进化策略

1963 年，德国柏林技术大学的两名学生 L. Rechenberg 和 H. P. Schwefel，在流体工程研究所从事研究时，遇到了如何确定

气流中物体的最优外形这类优化问题，由于当时的梯度法不适于解决这类问题，所以他们提出按照自然突变和自然选择的生物进化思想，对物体的外形参数进行随机变化并尝试其效果，由此而产生了进化策略。它的优化能力主要依靠变异算子的作用。后来受遗传算法的启迪，引入了杂交算子，但是杂交算子只是进化策略的辅助算子。

1.2.4.3 人工免疫系统

受生物免疫系统的隐喻，1986 年理论免疫学家 J. D. Farmer 等在一篇比较自然免疫系统、自适应和机器学习的论文中首次提出在生物免疫学和计算之间可能存在着关系。自此，诞生了一种新的智能优化算法，即人工免疫系统（AIS）。

人工免疫系统将优化问题中待优化的问题对应免疫应答中的抗原，可行解对应抗体（B 细胞），通过亲和力来描述候选解与最优解的逼近程度。如此则可以将优化问题的寻优过程与抗体进化的过程对应起来，将生物免疫应答中的进化链（抗体群—免疫选择—细胞克隆—高频变异—克隆抑制—产生新抗体—新抗体群）抽象为数学上的进化寻优过程，形成智能优化算法。

AIS 具有噪声忍耐、无教师学习、自组织、不需要反面例子、能清晰地表达学习的知识等特点，它结合了分类器、人工神经网络和机器推理等学习系统的许多优点，在机器学习、函数优化、模式识别、智能控制等方面具有广阔的应用前景。

1.2.4.4 DNA 计算

1994 年美国加利福尼亚大学的 L. M. Adlema 博士提出了 DNA 计算概念，并成功地解决了 Hamilton 路问题（Directed Hamiltonian Path Problem, DHPP），并成功地利用现代分子生物技术在 DNA 溶液的试管中进行了实验，开创了分子计算，特别是 DNA 计算的新纪元。DNA 计算为 NP 问题的解决提供了一种全新的途径。

DNA 计算的基本思想就是利用 DNA 特殊的双螺旋结构和 Watson-Crick 互补配对（也称碱基互补配对）规律进行信息编码。即对于某个具体数学问题的所有可能解，按照一定的规则将原始问题的数据对象映射成 DNA 分子链，用不同的 DNA 序列进行编码；然后在相关生物酶的作用下，生成各种数据池（data pool），并对经过高度并行映射后的 DNA 分子链在合适的条件下进行可控的生物化学操作（瞬间完成），生成新的 DNA 片断，即生成原始问题的所有可能的解空间。最后利用分子生物检测技术萃取出所需要的新的 DNA 片断（即待求问题的解）。

1.2.4.5 膜计算

膜计算的概念由罗马尼亚科学家 G. Paun 于 1998 年 11 月在芬兰图尔库计算机研究中心的研究报告中首次提出。膜计算的本质是从活细胞以及由细胞组成的组织或器官的功能和结构中抽象出用于计算的思想和模型。它是一种具有层次结构的分布式、并行计算模型。从微观的角度看，细胞中的细胞核、泡囊等被抽象成一个细胞中的细胞膜。这些膜将各个计算单元按区域划分，其中的数据结构具有多重性，可以用字符集或字符串来表示。生物细胞膜内的生化反应或细胞膜之间的物质交流被看成是一种计算过程，甚至细胞之间的物质交换也可以看成是计算单元之间的信息交流（C. G. Martin-vide et al, 2003）。从某种意义上来说，可以将整个生物体看成一个细胞膜，甚至可以将一个生物系统看成一个膜系统。

1.3 群体智能

1.3.1 群体智能简介

自然界很多生物往往是成群结队地进行群居生活，也许单个生物体的行为能力并不会令我们惊讶，但是一些群居型生物表现出的智能行为常常让人惊叹。例如蚂蚁可以协同合

作,集体搬运食物,建立坚固的蚁穴;大雁可以成群结队地排成人字形或一字形进行有序的飞翔;蜜蜂可以铸造结构庞大而精致的巢穴。在这些群居生物中虽然每个个体的智能不高,行为简单,也不存在集中的指挥,但由这些单个个体组成的群体,似乎在某种内在规律的作用下,可表现出异常复杂而有序的群体行为。

这种由群体生物表现出的智能现象受到越来越多学者的关注与重视。一些生物学家、仿生学家和计算机专家开始着手研究一些社会型动物(蚂蚁、鱼群、鸟群),试图建立一些模型用于解决一些实际难题。比较有影响力的研究有1986年C. Reynolds开发的Boid模型,该模型对鸟类的聚集行为、群体飞行行为进行了模拟,在计算机中复制和重现了现实世界中鸟类飞行、聚集行为。

生物学家F. Heppner等也开发了一种鸟群飞行模型,该模型与Boid在反映群体行为方面有许多相同之处,不同的地方在于它更加注重对鸟群趋同性行为的研究。

1989年S. Goss等进行了著名的“双桥实验”,实验表明蚂蚁总是能够找到蚂蚁巢穴与食物源之间的最短路径。1991年M. Dorigo等根据“双桥试验”提出了著名的蚂蚁算法,标志着群体智能研究的诞生。此后,1995年J. Kennedy与R. C. Eberhart在Reynolds和F. Heppner鸟群聚集模型基础上提出了PSO算法;1999年牛津大学出版社出版了E. Bonabeau和M. Dorigo等编写的一本专著《群体智能:从自然到人工系统》(*Swarm intelligence: From Natural to Artificial System*),2001年J. Kennedy和R. C. Eberhart等编写了群体智能另一本专著《群体智能》(*Swarm Intelligence*)。自此,群体智能的研究成为一个热门的研究领域。

虽然从群体智能概念的提出到2009年已近20年,但它仍然是一个新兴的领域,群体智能的定义在学术界也没有一个统一的标准。“群体智能”名词的出现最早可以追溯到1989年G. Beni