

MIANYI KELONG XUANZE SUANFA DE YANJIU YU YINGYONG

免疫克隆选择算法的 研究与应用

石刚 马佳 赵伟 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

免疫克隆选择算法的研究与应用

石 刚 马 佳 赵 伟 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 石 刚 马 佳 赵 伟 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

免疫克隆选择算法的研究与应用 / 石刚, 马佳, 赵伟著. —沈阳: 东北大学出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0579 - 0

I. 免… II. ①石… ②马… ③赵… III. ①免疫—克隆—算法—研究 IV. ①Q785

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 080302 号



出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 10. 75

字 数: 202 千字

出版时间: 2014 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 4 月第 1 次印刷

组稿编辑: 牛连功

责任编辑: 刘 莹

封面设计: 刘江旻

责任校对: 辛 思

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0579 - 0

定 价: 25.00 元

前

言

优化问题大量存在于科学研究和工程应用中的各个领域，因而开展最优化方法的研究具有重要的理论意义和实用价值。传统的确定性优化方法存在诸多的局限性，难以解决当今社会日益增多的复杂问题。近年来，多学科交叉研究为解决此类问题提供了新的思路，其中以模仿生物免疫机理为理论基础的人工免疫优化算法在各领域的研究与应用中表现出优异的性能，已经成为解决复杂优化问题的有力工具。

人工免疫具有分布式、自学习、自适应、自组织和鲁棒性等特点，具有强大的信息处理和问题求解能力。免疫克隆选择算法是一种受生物免疫系统克隆选择原理启发而设计的新型智能优化算法。它结合了问题的先验知识和生物免疫系统的自适应能力，因而在信息处理方面具有较强的鲁棒性，在搜索过程中能更好地收敛到全局最优解。

人工免疫系统及相关概念自提出以来，一直受到国内外学者的关注，近几年来，涌现出许多研究团队和丰硕的成果，发表了大量的文章及专著。在这样一种科研环境下，在这几年研究成果的基础上，我们结合自己的研究，尝试在该领域中进行进一步的探讨和研究，希望探索新的研究方向。

本书在深入分析人工免疫系统及免疫克隆选择算法原理与特点的基础上，总结其不足之处，综合运用多种免疫学和遗传学思想，从多种角度对免疫克隆选择算法进行改进，并将改进算法应用于几种典型的优化问题。全书共9章，第1章绪论；第2章是人工免疫系统研究；第3章对免疫进化算法的基本原理与改进算法进行归纳和总结；第4

章是介绍几种免疫克隆选择算法的机理与实现方法；第5章对免疫克隆选择算法进行改进研究；第6, 7, 8章对改进算法在几种优化问题中的应用进行研究；第9章是结论与展望。本书的第1, 4, 6, 7, 8章由石刚撰写；第2, 3, 5, 9章由马佳撰写；最后由石刚和赵伟统稿并校稿。

本书是在作者博士论文的基础上修改而成的，是对博士在读期间研究成果的归纳和总结。本书的工作得到了国家自然科学基金(项目编号：61203368)、国家“863”课题(项目编号：2012AA02A605)、沈阳市科技攻关项目等课题的资助。上述基金项目的支持为作者创造了宽松的学术氛围和科研环境，在此谨向相关部门表示深深的感谢。

书中有关内容引用、参考了国内外相关专家和学者文献，在此向所有被引用文献的作者表示感谢。

人工免疫系统作为一个相对年轻的研究领域，目前还有很多问题有待深入研究，尤其是对免疫进化动力系统及其进化机制的研究。本书作者理论功底及水平有限，不准确、不全面之处在所难免，恳请读者和同行专家批评指正。

作 者

2014年3月

第1章	绪 论	1
1.1	引 言	1
1.2	最优化问题	3
1.3	智能优化算法	5
1.3.1	进化算法	6
1.3.2	群智能算法	7
1.3.3	其他优化算法	8
1.4	人工免疫系统研究概述	10
1.4.1	人工免疫系统的生物学基础	10
1.4.2	人工免疫系统的发展及研究现状	11
1.4.3	人工免疫算法研究现状	12
1.5	本书的主要研究内容	14
1.5.1	本书的主要工作	14
1.5.2	本书的组织结构	15
第2章	人工免疫系统研究	17
2.1	引 言	17
2.2	生物免疫系统	17
2.2.1	免疫学基本概念	18
2.2.2	生物免疫系统组成与功能	19
2.2.3	生物免疫系统的特点	21
2.2.4	生物免疫应答与免疫记忆	21
2.2.5	免疫系统克隆选择理论	23
2.2.6	独特性免疫网络理论	23
2.3	人工免疫系统的研究内容和范围	24
2.4	人工免疫系统与其他方法的比较	26
2.4.1	人工免疫系统与进化计算	26

2.4.2	人工免疫系统与人工神经网络	26
2.4.3	人工免疫系统与一般的确定性优化算法	28
2.5	小 结	28

第3章 免疫进化算法

3.1	引 言	29
3.2	人工免疫算法	29
3.2.1	人工免疫算法原理	29
3.2.2	人工免疫算法特点	30
3.2.3	人工免疫算法流程	31
3.2.4	人工免疫算法与其他算法的比较	33
3.3	免疫遗传算法	33
3.3.1	免疫疫苗	34
3.3.2	免疫算子	35
3.3.3	免疫遗传算法基本流程	36
3.4	阴性选择算法	37
3.5	人工免疫网络算法	39
3.6	小 结	40

第4章 免疫克隆选择算法

4.1	引 言	41
4.2	克隆选择原理与应用	42
4.2.1	克隆选择原理	42
4.2.2	克隆选择在优化中的应用	44
4.3	克隆选择算子的机理与构造	46
4.3.1	克隆选择算子	46
4.3.2	基因变异算子	47
4.4	免疫克隆选择算法的流程	47
4.5	免疫克隆选择算法的特点	49
4.6	免疫克隆选择算法与进化计算的比较	50
4.7	小 结	50

第5章 免疫克隆选择算法的改进研究

5.1	引 言	52
-----	-----------	----

5.2 基本免疫克隆选择算法的不足	52
5.3 免疫显性克隆选择算法	54
5.3.1 抗体免疫显性	54
5.3.2 克隆算子	55
5.3.3 指数型变异	56
5.3.4 免疫显性克隆选择算法流程	58
5.4 主从式免疫克隆选择算法	59
5.4.1 主从式结构	59
5.4.2 子种群的改良	60
5.4.3 主种群的改良	62
5.4.4 迁入和迁出	63
5.4.5 主从式免疫克隆选择算法流程	63
5.5 自适应全局免疫克隆选择算法	65
5.5.1 选择算子	65
5.5.2 克隆算子	66
5.5.3 变异算子	66
5.5.4 自适应全局免疫克隆选择算法流程	68
5.6 不同算法之间的比较	69
5.7 小 结	79

第 6 章	免疫显性克隆选择算法求解 CVRP	80
--------------	--------------------------------	-----------

6.1 引 言	80
6.2 物流配送问题描述	81
6.3 物流配送问题数学模型的建立	83
6.3.1 问题的假设与说明	83
6.3.2 物流配送问题数学模型	84
6.4 物流配送问题求解方法	85
6.5 免疫显性克隆选择算法解决 CVRP 的算法实现	86
6.6 仿真实例与分析	90
6.6.1 小规模 BENCHMARK 实例仿真与分析	91
6.6.2 中大规模 BENCHMARK 实例仿真与分析	92
6.7 小 结	97

第7章	主从式免疫克隆选择算法求解 TAP	98
7.1	引言	98
7.2	任务分配问题描述	98
7.3	任务分配问题的数学模型	99
7.4	主从式免疫克隆选择算法解决 TAP 的算法实现	101
7.4.1	抗体编码及适值函数建立	101
7.4.2	主从式免疫克隆选择算法解决 TAP 的流程	102
7.5	仿真实例与分析	104
7.6	小结	115
第8章	自适应全局免疫克隆选择算法优化 FLC	116
8.1	引言	116
8.2	模糊逻辑控制器的设计	117
8.2.1	FLC 的语言变量	117
8.2.2	语言变量值的选取	118
8.2.3	隶属度函数的选取	118
8.2.4	控制规则的确定	121
8.2.5	模糊推理及决策	121
8.3	基于 AGICSA 的 FLC 优化设计	122
8.4	基于 AGICSA 的 PHEV FEMC 设计与优化	124
8.4.1	并联式混合动力汽车描述	125
8.4.2	模糊能量管理控制器设计	126
8.4.3	模糊能量管理控制器优化	128
8.4.4	仿真结果与分析	129
8.5	小结	136
第9章	结论与展望	137
附录	CVRP BENCHMARK	140
参考文献		143

第1章 绪 论

1.1 引 言

进入 21 世纪,科学技术正处于多学科相互交叉和渗透的时代,随着计算机技术的广泛应用,优化这门学科也得到了蓬勃的发展。优化对象的日益复杂化及对优化技术提出的更高需求,促进优化理论及技术不断地被深入研究,并且这些方法和技术被广泛地应用于工程技术领域。经典优化算法与生命科学中的生物理论相结合,涌现出很多具有自组织、自适应、自学习等智能特征的智能优化算法,解决了许多传统优化方法不能解决的问题,推动了优化理论及技术的发展^[1]。

优化是一个经典且有意义的课题,最早可以追溯到十分古老的极值问题。优化问题求解是人工智能的一个重要的应用领域,优化问题也一直是人们感兴趣的问题之一。鉴于该问题的普遍性和重要性,几十年来得到了广泛和深入的研究,不断涌现出新的理论和方法,满足了科学与技术发展的需要,许多新的理论和算法已经用来解决科学计算与工程应用中的许多问题^[2]。在现实生活中,最优化问题存在于方方面面,如电力系统故障诊断^[3]、电厂循环水泵组合优化^[4]、配电网多目标重构^[5]、水库优化调度^[6]、机械优化^[7]、流水车间作业调度^[8]、人脸识别系统设计^[9]和其他复杂优化问题^[10-14]。最优化问题已经受到科研机构、政府部门和产业部门的高度重视。

自然界中的生物对其生存环境具有良好的适应性,各物种在一种竞争的环境中生存,优胜劣汰,使物种得以不断改进。这种自然进化的能力令人惊叹。几十年来,人们从不同的角度对生物系统及其行为特征进行了模拟,产生了一些对现代科技发展有重大影响的智能优化算法。基于对生物进化过程的模拟,人们开发了具有较强鲁棒性的通用计算模型,产生了进化计算理论。对传统数学方法难以

解决的复杂问题,智能优化算法作为一种模拟生物自然进化过程的随机优化算法,在解决这类优化难题时,通常显示出优于传统优化算法的性能。近年来,研究者们提出了很多智能系统,如神经网络、进化计算、免疫计算、模糊系统,凭借简单通用、鲁棒性强、适于并行处理的优点,成为智能科学领域研究的热点,且已在并行搜索、联想记忆、模式识别、智能控制等领域得到了广泛的应用^[15]。

多年来,生命现象和生物智能行为一直为科学家所关注,他们从中获得灵感,创立了许多不同的学说和理论,其中一个重要的领域就是生物免疫系统。生物免疫系统是一个具有高度并行处理能力的分布式、自适应和自组织的系统,它可以保护人体不受外部病原体的侵害,它不依靠任何中心控制,具有分布式任务处理能力,具有在局部采取行动的智能,它通过起交流作用的化学信息构成网络,进而形成全局概念。目前,计算机工作者们已从生物免疫系统中获得了一些重要的启示和借鉴,并且将其应用于解决计算机工程应用中的一些用一般方法难以解决的复杂问题。

人工免疫系统(artificial immune system, AIS)是模仿自然免疫系统功能的一种智能方法,它实现一种受生物免疫系统启发,通过学习外界物质的自然防御机理的学习技术,提供噪声忍耐、无教师学习、自组织、记忆等进化学习机理,结合了分类器、神经网络和机器推理等系统的一些优点,因此具有提供新颖的解决问题方法的潜力。其研究成果涉及许多科学研究领域,已经成为继神经网络、模糊逻辑和进化计算后人工智能的又一研究热点^[16-19]。

克隆选择原理是生物免疫系统的一种自然选择模式,克隆选择的过程类似生物进化。在人工免疫系统研究中,许多方法都借用了克隆选择的思想,在实现过程中,也嵌入克隆选择机制。与此同时,基于克隆选择原理的应用研究尚不完善,许多免疫性质只是隐喻使用,并没有真正在人工系统中得到实现。随着人们对免疫系统的认识的不断深入,应该有更多的免疫机制得到应用。

综上所述,从理论和应用两方面来看,对免疫克隆选择理论的应用进行有意义的探索,将更多隐含的免疫机理用于解决实际问题,突出免疫学理论在实际问题中的应用效果。在这种研究背景下,本书对基于克隆选择原理的免疫克隆选择算法的原理和应用加以介绍与讨论,并提出新的改进算法,用于解决物流配送调度问题、任务分配问题和模糊控制问题,期望所取得的成果对免疫克隆选择算法的发展产生一定的促进作用。

1.2 最优化问题

最优化是一个古老的课题,它所研究的问题是在众多方案中寻找最优方案。长期以来,人们对最优化问题进行了探讨和研究。早在17世纪,英国 Newton 和德国 Leibnitz 发明的微积分就蕴含了优化的内容。而法国数学家 Cauchy 则首次采用梯度下降法解决无约束优化问题,后来,针对约束优化问题,又提出了 Lagrange 乘数法。人们关于优化问题的研究工作随着历史的发展而不断深入。但是,任何科学的进步都受到历史条件的限制,直到20世纪40年代,随着科学技术突飞猛进的发展,尤其是高速数字计算机日益广泛的应用,使优化问题的研究不仅成为一种迫切需要,而且有了求解的有力工具。因此,优化理论和算法迅速发展起来,形成一门新的学科。至今,已出现线性规划、整数规划、非线性规划、几何规划、动态规划、随机规划、网络流等许多分支。这些优化技术在实际应用中正发挥着越来越大的作用^[20]。

很多实际问题都可以转化成优化问题,然后从数学的角度求解其最优解,即对于给出的实际问题,从众多的选择中选出符合条件的最优方案。从数学意义上说,最优化问题是指在一组约束为等式或不等式的条件下,使系统的目标函数达到极值,即最大值或最小值。从经济意义上说,是在一定的人力、物力和财力资源条件下,使经济效益(如产值、利润)达到最大,或者在完成规定的生产或经济任务下,使投入的人力、物力和财力等资源为最少。一般来说,最优化问题的数学模型可描述为

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i=1, 2, \dots, p \\ h_j(x) = 0, & j=1, 2, \dots, q \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1)$$

这里, $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 中的所有变量都被称为决策变量。 $f(x)$ 称为目标函数值。 $g_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, p$) 为第 i 个不等式约束, p 为不等式约束的个数。 $h_j(x)$ ($j=1, 2, \dots, q$) 为第 j 个等式约束, q 为等式约束的个数。 x 的取值范围叫作问题的定义域,记为 D 。既在定义域 D 内又满足所有约束的 x 叫作可行解(feasible solution),所有的可行解组成的区域称为可行域 Ω 。若 $f(x^*) = \min f(x)$, 且 $x^* \in \Omega$, 则 x^* 称为全局最优解(global optimal solution)。若在 x^* 的一个邻域 Δ

$\subset \Omega$ 内, 有 $f(x^*) = \min f(x)$, 则 x^* 称为局部最优解(local optimal solution)。若所有变量都是实数, 则该问题为连续优化问题; 若所有变量都是整数, 则该问题为整数规划问题, 特别地, 若所有变量只有两种可能值, 即 0 或 1, 则该问题为 0-1 整数规划问题; 若该问题中的部分变量为实数, 部分变量为整数, 则该问题为混合整数规划问题。

对于以上优化问题的数学模型, 若 $p = q = 0$, 即约束不存在, 则该问题称为无约束优化问题。若 $p + q \neq 0$, 即该问题存在约束条件, 则称为约束优化问题。具体地, 若目标函数 $f(x)$ 和所有约束 $[g_i(x) (i = 1, 2, \dots, p) \text{ 和 } h_j(x) (j = 1, 2, \dots, q)]$ 都是线性函数, 则称该优化问题为线性规划问题(linear programming problem)。若目标函数 $f(x)$ 和所有约束 $[g_i(x) (i = 1, 2, \dots, p) \text{ 和 } h_j(x) (j = 1, 2, \dots, q)]$ 中至少有一个是非线性函数, 则称该优化问题为非线性规划问题(nonlinear programming problem)。

典型的组合优化问题有旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)、加工调度问题(scheduling problem, 如 flow-shop, job-shop)、0-1 背包问题(knapsack problem)、装箱问题(bin packing problem)、图着色问题(graph coloring problem)、聚类问题(clustering problem)等。这些问题具有很强的工程背景, 数学描述虽然简单, 但最优化求解很困难, 其主要原因是“组合爆炸”^[21]。

物流配送问题(vehicle routing problem, VRP)是指按照用户(商品的购买者、需求方、货主等)要求, 将实体物资(商品、货物、原材料、零配件、半成品等)从供给地向需求地转移的过程, 是管理工程和技术工程相结合的综合学科^[22], 它应用系统工程学科的原理和相关技术领域的最新成果, 提高物流系统的水平与效率, 实现了物流的时间效益与空间效益。通过结合数学方法和智能优化算法来实现配送调度计划是物流配送研究主要解决的问题, 同时也是国内外专家、学者普遍关注的重要课题之一, 它可以有效地降低配送成本、提高配送效率。物流对于发展经济, 加强军事力量, 改善人们的物质和文化生活, 扩大国际技术、经济文化的交流等, 都具有重要意义。因此, 建立一个物流配送网络模型是具有实际意义的研究。该模型不但适合于物流配送网络的研究, 而且适用于很多网络问题的研究, 如水网、电网等。因此, 对该问题的研究具有相当广泛的应用背景。

任务分配问题(task assignment problem, TAP)是指在分散系统中, 将一些工作分配给一定数量的处理器^[23]。TAP 问题实际上是 0-1 整数规划问题, 它的目标是最小化处理器之间的通信成本和工作处理成本的总和。TAP 问题总是试图在不违反资源约束的前提下, 获得问题的最小成本。

模糊控制^[24]是模糊数学和控制理论相结合的产物,特别适用于那些难以获得过程的精确数学模型及具有时变时滞、非线性、大滞后的复杂工业控制系统,具有较强的鲁棒性和抗干扰能力。模糊控制系统的核心是模糊控制器,而模糊控制规则是设计模糊控制器的核心,它实际上决定了控制系统的性能及控制效果。以前,模糊控制规则完全是凭操作者的经验或专家知识获取的,并不能保证规则的最优或次最优,具有一定的盲目性。为适应现代工业控制的要求,模糊控制器在应用中正朝着自适应、自组织、自学习的方向发展,使模糊控制真正达到仿人工智能控制的目的。因此,如何设计出合理可行的模糊控制器,对产品质量和产量的提高、能耗的降低等,都起到关键的作用。

传统数值优化方法在解决以上类似的复杂实际优化问题上遇到困难,因为这些方法都要求实际问题是连续的、可导的,因此,它们很难解决离散的、不可微的优化问题。从现阶段来看,为了能很好地解决问题,可以借助于智能优化算法,探索解决复杂优化问题的新途径。

1.3 智能优化算法

对于现实中存在的许多非凸规划问题,采用梯度下降法、牛顿法、模式搜索等定性方法,一般会收敛于局部极值,全局意义上的最优解的求取相当困难,特别是问题的规模比较大时,随着优化问题的约束条件和变量数目增加,这些算法的迭代次数迅速增加,甚至会以指数上升,导致收敛速度缓慢,求出其最优解几乎不可能。为了可靠解决全局优化问题,人们试图离开解析确定型的优化算法研究,转而探讨对函数解析性质要求较低甚至不作要求的随机型优化方法。近十多年来,人们模拟自然界的一些自然现象发展起来一系列仿生型智能优化算法,如模拟退火方法、进化类算法、群体智能算法等启发式算法^[25]。

20世纪80年代以来,一些新颖的优化算法,如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法、和声搜索算法、人工免疫算法及其混合优化策略等,通过模拟或揭示某些自然现象或过程而得到发展,其思想和内容涉及系统科学、信息科学、人工智能等方面,大大丰富了现代优化技术,也为那些传统优化技术难以处理的组合优化问题提供了切实可行的解决方案。这些算法独特的优点和机制,引起了国内外学者的广泛关注,并在诸多领域得到了成功的应用^[26]。

1.3.1 进化算法

进化算法(evolutionary algorithm, EA)是一种模拟生物进化过程与机制求解问题的自组织、自适应人工智能技术,是一种具有“生成+检测”(generate and test)的迭代过程的搜索算法^[27]。进化算法是模拟由个体组成的群体的集体学习过程,其中每个个体表示给定问题搜索空间中的一个点。进化算法从初始群体出发,通过选择、变异和重组过程,使群体进化到搜索空间中越来越好的区域。选择过程使群体中适应性好的个体比适应性差的个体有更多的复制机会,重组算子将父辈信息结合在一起,并将他们传到子代个体,变异在群体中引入了新的变种。

进化算法的研究起源于20世纪60年代,进化算法的两个主要特点是群体搜索策略及群体中个体之间的信息交换。它们的优越性主要表现在:首先,进化算法在搜索过程中不容易陷入局部最优,即使在所定义的适应度函数是不连续的,非规则的或有噪声的情况下,它们也可能以很大的概率找到全局最优解;其次,由于它们固有的并行性,进化算法非常适合于向量并行机;再次,进化算法采用自然进化机制来表现复杂的现象,能够快速可靠地解决非常困难的问题;最后,由于它们容易介入到已有的模型中,并且具有可扩展性,以及易于同其他技术混合等因素,进化算法已经在最优化、机器学习和并行处理等领域,得到了越来越广泛的应用^[28]。

遗传算法(genetic algorithm, GA)是由美国密西根(Michigan)大学的 John Holland 于1975年首次提出的,它是一种借鉴生物界自然选择和遗传机制的随机搜索算法。GA是一种通用的优化算法,其编码技术和遗传操作都比较简单,优化不受限制性条件约束,它的两个最显著的特点是隐含并行性和全局空间搜索。目前,遗传算法越来越受到人们的重视,并在函数优化、组合优化、生产调度、自动控制、机器学习、模式识别、图像处理等领域得到了成功的应用^[29]。

从数学角度看,遗传算法是一种随机搜索算法。从工程角度看,它是一种自适应的迭代寻优过程。它从某一随机产生的初始群体开始,按照一定的操作规则,如选择、复制、交叉、变异等,不断地迭代计算,并根据每一个个体的适应度值,保留优良个体,淘汰劣质个体,引导搜索过程向最优解逼近。

遗传算法主要包括三个重要的算子^[30]:选择、交叉和变异。在自然进化过程中,对环境适应能力强的个体将有更多的机会产生下一代,适应能力弱的个体产生后代的机会相对较少。遗传算法中使用选择算子,可以在避免基因损失、提

高搜索速度和全局收敛方面,起到举足轻重的作用。遗传算法的交叉算子按照一定的规则来使两个相互配对的个体相互交换部分基因,这样就形成了新的个体。在交叉操作之前,要对个体进行配对操作。最常用的配对方式是随机配对,即将当前群体中的 M 个个体以随机的方式组成 $M/2$ 个配对组。在遗传算法中,用变异算子来模拟这种生物变异过程,变异算子将个体编码串中的某些基因座上的基因用其他等位基因来替代,从而形成一个新个体。变异算子可以改善遗传算法的局部搜索能力,维持群体的多样性,防止算法进入早熟的状态。

遗传算法的算法结构简单,控制参数易于调节,具有较好的空间开发能力。由于其自身良好的优化性能,遗传算法已经被应用到多个优化问题。如机器排序问题(one machine sequencing problem)^[31]、复合叠层板的多领域优化(multidisciplinary optimization of composite laminates)^[32]、非凸非线性规划问题(nonconvex nonlinear programming problems)^[33]、网络设计技术^[34]、自动视觉检测^[35]、水质评价^[36]、CMOS 组合电路静态功耗优化^[37]和交通信号配时问题^[38]。

最优化问题大量存在于人们的日常生活中,作为一种优化工具,遗传算法正受到越来越多的研究者的关注。近年来,国外对于遗传算法的改进和研究已经趋于成熟,相比而言,国内的研究者对遗传算法的研究正处于起步阶段,还需投入更多的人力物力,使得遗传算法能够应用到更广阔的领域,为国家的建设提供有力的技术支持。

1.3.2 群智能算法

随着人类对生物启发式计算的研究,一些社会性动物(如蚁群、蜂群、鸟群)的自组织行为引起了科学家的广泛关注。这些社会性动物在漫长的进化过程中,形成了一个共同的特点:个体的行为都很简单,但当它们一起协同工作时,却能够显示出非常复杂的智能行为特征。目前,群智能理论研究领域主要有两大类算法:蚁群算法(an colony optimization, ACO)^[39]和粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)。

① 蚁群优化算法是一种基于群体协作的优化算法,它启发于蚁群的觅食活动。首先由意大利学者 M. Dorigo 等于 20 世纪八九十年代提出^[40]。该算法的核心内容是蚂蚁在运动的过程中,是靠一种外激素来同其他个体进行交流、通讯。蚂蚁经过的地方都会留下一一种特殊的激素,并且可以识别这种物质存在,感知该物质浓度的强弱,蚂蚁趋于这种物质浓度高的路径前进。这种思想实际上也是一优化搜索策略,这种搜索过程可以用两个基本阶段来描述:自身调整阶段和群体协

作阶段。前一阶段中,各个体根据积累的信息不断调整自身结构;在后一阶段,个体之间通过信息交流,以期产生性能更好的解。现实中的蚁群觅食的特点使蚁群优化算法能够解决离散优化问题。

蚁群优化算法具有较强的优化性能,已经被应用到多个优化领域,如集成化工艺规划与调度(integrated process planning and scheduling)^[41]、非线性 PID 参数优化(nonlinear PID parameter optimization)^[42]、集合覆盖问题(set covering problem)^[43]和双目标最短路径问题(bi-objective shortest path problem)^[44]。

② 粒子群优化算法是由 Kennedy 和 Eberhart^[45]于 1995 年提出的一种智能优化算法。与遗传算法类似,粒子群算法也是一种基于种群智能的优化算法,它用无质量无体积的粒子作为个体,并为每个粒子规定简单的行为规则,从而使整个粒子群表现出复杂的特性,可用来求解复杂的优化问题。由于 PSO 概念简单、易于实现,因而在短期内得到很大发展,迅速得到了国际演化计算研究领域的认可,并在很多领域得到应用。

粒子群优化算法具有算法参数少且易于控制等特点,因此,在国内外,研究者对于粒子群优化算法的研究和应用非常广泛。如无标记人员跟踪问题^[46]、结构设计优化问题^[47]、PID (proportional-integral-derivative) 设计问题^[49]、带有离散变量的桁架结构问题^[49]、非平滑经济调度问题(non-smooth economic dispatch, NED)^[50]、双线性系统的参数评估问题^[51]、装配序列规划问题^[52]、汽车零配件配载^[53]、传感器调度^[54]、跳频信号参数估计^[55]。粒子群优化算法简单,且具有一定的实用性。因此,它已经受到国内外研究者越来越多的关注,对于粒子群算法的改进和应用一直是人们关注的焦点。

1.3.3 其他优化算法

① 禁忌搜索算法(tabu search, TS)的思想最早是由 Glover 在 1986 年提出的,它是对局部领域搜索的一种扩展,是一种全局逐步寻优算法,是对人类智力过程的一种模拟。禁忌搜索算法通过引入一个灵活的储存结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,进而保证多样化的有效探索,以实现全局优化^[2]。禁忌搜索算法用了一个禁忌表(Tabu 表)记录下已经到达过的局部最优点,在下一次搜索中,利用禁忌表中的信息,不再或有选择地搜索这些点,以此来跳出局部最优点,这些被禁止访问的解可以认为处于“休眠”状态。在某些时候,为了使算法能继续寻找满意解,需要“激活”Tabu 表中的某些解,使之参与搜索过程。禁忌搜索算法是一种人工智能算法^[56]。