

doi 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.006

(a. College of Computer Science, b College of Manufacturing Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Key words genetic algorithms (GA); genetic operators; control parameters; combinatorial optimization

初始种群产生之后,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生出越来越好的近似解。在每一代,根据问题域中个体的适应度大小选择个体,并借助自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异,产生出代表新的解集的种群。这个过程使种群像自然进化一样,后代种群比前代更加适应于环境,末代种群中的最优个体经过解码可以作为问题近似最优解。利用遗传算法求解问题的流程^[6]如图1所示。

自 1985 年起, 国际遗传算法会议每两年召开一次, 在欧洲, 从 1990 年开始每隔一年也举办一次类似的会议。1993 年, 国际上第一本以遗传算法和进化计算为核心内容的学术期刊《Evolutionary Computation》(进化计算) 在 MIT 创刊; 1994 年, 在美国奥兰多召开的 IEEE World Congress on Computation Intelligence (IEEE 全球计算智能大会) 上, 进化计算与模糊逻辑、神经网络一起统称为计算智能; 1997 年, 《IEEE Transactions on Evolutionary Computation》创刊。这些刊物及时全面地报道了近年来遗传算法的最新研究成果。目前, 与遗传算法有关的学术会议包括 ICGA、PPSN、CEC、ANN&GA、EP、FOGA、COGANN、EC、GP、SEAL 等。

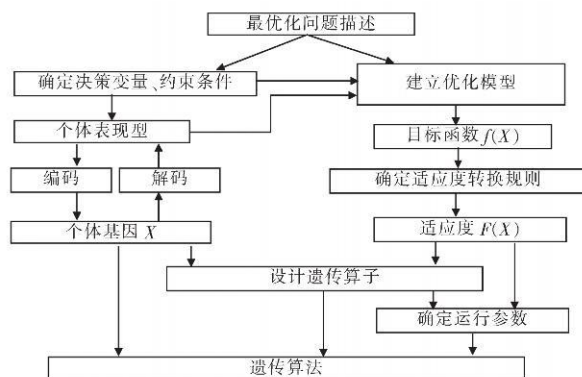


图 1 遗传算法求解问题过程

1 遗传算法原理

遗传算法^[1]是模拟生物在自然环境中优胜劣汰、适者生

- 建立数学模型。
- 编码,即用设计好的算法将表现型映射到个体基因型。
- 解码,遗传算子只对编码后的染色体起作用,由个体表

收稿日期: 2010-01-01; 修回日期: 2010-02-27

作者简介: 边霞 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为网络安全 (593470285@qq.com); 米良 (1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算机集成制造。

现型计算目标函数值后就可以判断染色体的优劣。

d) 确定适应度转换规则, 染色体所对应的解空间的值可能相差很大, 需要一定的转换使其适合定量评估个体的优劣。

e) 设计遗传算子, 即设计交叉、变异和选择算子等。遗传算子与待优化问题、染色体的编码方案有很大的关系。

f) 确定运行参数, 运行参数包括交叉概率、变异概率和种群数目等。遗传算法本身的参数还缺乏定量的标准, 目前采用的多是经验数值, 并且遗传参数的选取与编码和遗传算子的设计有很大关系。

2 遗传算法的改进

目前在遗传算法的应用中, 最突出的问题是局部搜索能力差和容易出现早熟现象。近年来, 众多学者围绕这两个核心问题发表了大量有价值的学术论文^[7-31], 从各方面对遗传算法进行了改进。

2.1 遗传算子的改进

在遗传算子方面, Pan 等人^[7]提出自适应变异算子, 使得变异能够根据解的质量自适应地调整搜索区域, 较明显地提高了搜索能力。Louis 等人^[8]根据个体之间的海明距离进行非均匀的交叉和变异, 在保持群体多样性的同时还防止了早熟。夏虎等人^[9]提出了一种考虑环境作用的协同免疫遗传算法, 在该算法中, 设计了克隆环境演化算子和自适应探索算子, 并构造了三个子种群协同进化来发挥克隆环境演化算子的作用, 从而提高了算法的全局搜索能力。蔡良伟等人^[10]提出一种改进的交叉操作, 根据种群的多样性和个体的相关性选择不同的交叉策略以减少无效的交叉操作, 从而提高了交叉操作的效率并改善了算法的收敛性能。江雷等人^[11]提出的基于并行遗传算法求解 TSP 对遗传算法的杂交算子进行改进, 探讨了使用弹性策略来维持群体的多样性, 使得算法跨过局部收敛的障碍, 向全局最优解方向进化。Whitley 等人^[12]提出了自适应和有指导的变异, 这种方法对改进遗传算法的性能起了一定的作用。

2.2 多种群遗传算法

一些学者提出了基于多种群的遗传算法, 将一个大的种群分成多个小的种群, 每个小种群独立地进行进化, 进化一定代数后进行种群间的通信。由于这种方式可以采用并行计算的模式, 取得了较好的效果。贺新等人^[13]介绍了一种基于新的变异算子多种群的新遗传算法, 该算法引入一种基于主群、附属子群的结构, 可避免传统遗传算法难以克服的早熟收敛问题。叶在福等人^[14]引入多种群, 对不同种群赋予不同的控制参数, 实现不同的搜索目的, 通过移民算子联系各种群, 通过人工选择算子保存各种群每个进化代中的最优个体, 对遗传算法的早熟现象有了很大的改进。朱灿等人^[15]提出了一种考虑性别特征的遗传算法, 该方法模拟生物系统多物种同时进化, 指出最优种子的获得不但需要一个好的个体(父体), 而且需要一个好的进化方向(母体), 通过增加母体的方法加速最优物种的进化, 从而提高了算法的效率。

2.3 优化控制参数

遗传算法的控制参数主要有种群数目 N_{pop} 、交叉概率 P_c 和变异概率 P_m , 不同的参数组合对遗传算法的运行性能影响很大。De Jong^[16]首先系统地研究了不同的参数组合对遗传算

法的性能影响, 他对五个函数进行测试后, 提出了一组参数选择范围: $N_{pop} = 50$ $P_c = 0.6$ $P_m = 0.001$, 这一组参数值后来被作为标准参数广泛使用。丁承明等人^[17]提出了利用正交试验法去优化选取控制参数, 这种方法利用正交试验的均衡分散性, 使得通过较少的试验次数就能搜索大部分参数组合空间, 而且还可以确定哪个参数对结果影响最显著, 然后有针对性地进行精确的搜索, 从而使得参数问题得到圆满解决。李康顺等人^[18]提出的改进遗传算法能够根据个体适应度大小和群体的分散程度自动调整遗传控制参数, 从而能够在保持群体多样性的同时加快收敛速度, 克服了传统遗传算法的收敛性差、易早熟等问题。

2.4 基于常识启发的改进

很多学者受常识的启发对遗传算法进行了改进。Reynold 等人^[19-21]提出的文化算法是一种模拟人类文化进化机制的算法, 它模拟了种群空间和信赖空间两级的进化。在信赖空间级存储和提炼由种群进化中获取的解决问题的知识及经验; 而种群级在信赖空间级的指导下不断进化, 最后收敛。王磊等人^[22, 23]研究的免疫遗传算法根据生物的免疫原理, 将免疫算法中抗体多样性的维持机制、记忆机制、促进抑制机制引入到遗传算法中, 在标准遗传算法的基础上提出了加速实数编码的免疫遗传算法。该算法改进了基本遗传算法群体多样性差、搜索区间大和免疫算法容易陷入局部最优以及进化后期搜索停滞不前的性能, 使其快速成熟收敛的同时又提高了局部寻优和全局寻优的能力。朱灿等人^[24]将物种的概念引入遗传算法, 提出了一种基于物种选择的遗传算法, 根据种子到当前最优点的距离将种群分为当前最优物种和物种仓库, 对这两个物种分别以不同的交叉概率和变异概率进行遗传运算, 以平衡种群的选择压力和种群多样性, 在提高算法效率和稳定性方面取得了很好的效果。周兰凤等人^[25]提出了一种基于知识的遗传算法, 该算法采用特定的遗传算子, 将领域知识纳入初始种群及自适应调整控制参数, 克服了传统遗传算法的早熟收敛问题, 提高了遗传算法的效率。Giritez 等人^[26]对进化算法中加入知识的各种技术进行了分类和归纳, 设计了一种基于知识的快速进化算法并将其用于机器学习问题, 实验结果表明, 该算法不但能保证解的质量而且大大缩短了计算时间。

2.5 与其他智能算法结合

遗传算法的全局搜索能力较强, 能较快地确定全局最优解, 但局部搜索能力较弱, 进一步精确求解要耗费很长时间。因此, 将局部搜索能力强的算法与遗传算法结合可以相互取长补短。Hageman 等人^[27]提出了遗传算法与禁忌搜索相结合的策略; 魏明等人^[28]将遗传算法与混沌优化相结合, 在遗传进化过程中, 根据种群相对多样性对每代个体引入混沌领域方法搜索有效基因, 并有效地结合遗传算法善于全局优化和混沌局部搜索能力强等特点, 显著提高了计算效率, 具有较大的实用价值。任子武等人^[29]将遗传算法与粒子群优化方法相结合, 采用混沌序列产生初始种群、非线性排序选择、多个交叉后代竞争择优和变异尺度自适应变化等改进遗传操作, 并通过精英个体保留、粒子群优化及改进遗传算法 (IGA) 三种策略共同作用产生种群新个体, 以克服常规算法中收敛速度慢、早熟及局部收敛等缺陷。此外, 还有遗传算法与模拟退火算法相结合^[30]、遗传算法与单纯形法相结合^[31]、遗传算法与神经网络

相结合^[32]、遗传算法与模糊集相结合^[33]、遗传算法与爬山法和梯度法等局部搜索算法相结合^[33]、遗传算法与小生境技术相结合^[34]、将量子计算与遗传算法相结合形成量子遗传算法^[35]、在遗传算法中加入免疫算子构成免疫进化算法^[36]等。这些混合策略不但提高了算法的性能,还扩展了算法的应用领域。

还有许多学者从其他方面对遗传算法进行了改进,如设计交互式遗传算法、引入量子理论等。这些改进都在某种程度上提高了遗传算法的性能,然而这些改进都具有一定的局限性。因此,提高遗传算法的收敛速度、克服早熟现象将是一个永恒的目标。

3 遗传算法的应用进展

由于遗传算法具有全局并行搜索、简单通用、鲁棒性强等优点,使得遗传算法广泛地应用于计算机科学^[37, 38]、自动控制^[39-42]、人工智能^[43-50]、工程设计^[51, 52]、制造业^[37, 53]、生物工程^[54]和社会科学^[53, 55, 56]等领域。

3.1 在计算机科学与人工智能方面

遗传算法在计算机科学与人工智能领域中的应用包括数据库查询优化^[57]、数据挖掘与知识获取^[58, 59]、人工神经网络结构与参数优化^[60-63]、模式识别^[64, 65]、专家系统^[66, 67]等。另外,遗传算法在软件测试用例^[68]自动生成方面也作出了很大的贡献。

3.2 自动控制领域

遗传算法可用于求解系统参数辨识问题。Karr^[39]采用遗传算法设计自适应模糊逻辑控制器,取得了显著的效果;Esposito等人^[69]将基于GA的优化技术应用于RBF神经网络输出层权值的优化;Vesin等人^[70]将GA用于解决网络结构和权值的完全优化问题。遗传算法也可用于控制器参数优化整定;Fonesca等人^[71]将MOGA(多目标遗传算法)用于控制器的优化设计以解决磁悬浮列车的控制器设计问题;颜文俊等人^[72]则提出了一类新型的多目标鲁棒优化控制器设计方法,通过有效算法求解满足系统鲁棒稳定性和鲁棒性能的优化解。此外,GA在故障诊断^[73]和机器人行走路径规划^[74]中的应用也取得了成功。

3.3 在组合最优化问题方面

组合优化(combinatorial optimization)研究那些含有有限个可行解的、日常生活中大量存在的问题。这其中一个重要并且普遍的应用领域就是考虑如何有效利用稀缺资源来提高生产力^[75]。GA在组合优化问题中的应用包括路径覆盖^[76]、装箱^[77, 78]、背包^[79]、确定最小生成树^[80]、机器调度排序与平衡^[81]、车辆路径^[82]、网络设计与路径^[83]、旅行推销员分配^[84]等。

3.4 在多目标函数优化问题方面

多目标问题最早由意大利经济学家Pareto在1896年从政治经济学的角度提出的。多目标群体决策是当前管理科学、决策理论、系统工程、运筹学、福利经济学等学科研究中十分重要的内容^[85]。GA很适合求解多目标优化问题,因为GA可以并行地处理各个目标,避免了目标间的优先排序处理。GA通过保持一个潜在解的种群进行多方向搜索,这种种群对种群的搜索可以跳出局部最优解,从而突破了数学规划法的点对点的搜索方法。GA在整个解空间同时开始寻优搜索,注重区域搜索

和空间扩展的平衡,因此可以有效地避免陷入局部极值点,具备全局最优搜索性,不会受到如Pareto曲面形状、目标个数等条件的限制,还可处理带随机的、不确定的离散搜索空间问题,这正是数学规划法所难以克服的。Hajela等人^[86]把多目标问题通过效用函数转换为单目标问题,再用GA来求解。目前,怎样利用GA的智能性来求解多目标函数优化问题,仍然是一个值得研究的新课题^[87, 88]。

3.5 遗传学习

将遗传算法用于知识获取,构成以遗传算法为核心的机器学习系统。比较经典的是Holland设计的用于序列决策学习的桶链算法(bucket brigade)反馈机制(该系统被称为分类器系统),以及机器人规则、概念学习、模式识别等。

3.6 社会与经济领域

早期的经济学研究采用遗传算法来求解数学公式,取得了不错的效果,但离机器学习还差得很远。例如,Lettau^[89]在1997年建立的一个简单的主体模型中就使用了这种方法;Bauer^[90]对遗传算法在经济与投资中的应用进行了全面分析。近年来,商业、金融领域已经成为遗传算法应用热点,目前已经有许多基于遗传算法的软件包应用于金融系统和股票投资分析。

4 结束语

遗传算法的研究归纳起来可分为理论与技术研究和应用研究两个方面。可以说,遗传算法的应用已经渗透到了各个领域。但目前遗传算法的算法分析和理论分析还没有跟上,还有很多富有挑战性的课题亟待完善与解决,主要有:

a)算法规模小。虽然遗传算法模拟了生物的进化过程,但目前遗传算法的运行规模还远小于生物的进化规模。随着计算机系统性能的不断提高,人们将有可能实现模拟更接近于自然的进化系统,从而充分利用遗传算法的并行性解决更复杂更有价值的问题。

b)遗传算法的编码问题。编码是遗传算法求解问题的前提,最基本的是二进制编码。其他的编码方法有格雷码、实数编码、符号编码、多参数编码和DNA编码等。不同的应用应该采用不同的编码方式,因此基于不同的应用,遗传算法的编码还有待改进与完善。

c)遗传算法控制参数的选择问题。遗传算法中控制参数的不同选取会对遗传算法的性能产生较大的影响,将影响到整个算法的收敛性。这些参数包括交叉概率(p_c)、变异概率(p_m)和种群数目(N_{pop})等。

d)早熟收敛和局部搜索能力差问题。早熟收敛和局部搜索能力差是遗传算法最突出的两个问题。有很多学者针对这两个问题发表了大量的学术文章,但从根本上解决这两个问题还有待研究发现。

e)遗传算子的无方向性问题。基本遗传算子包括选择算子、交叉算子和变异算子。设计性能优良的遗传算子一直是遗传算法的重要问题,如果能从遗传算子的方向性着手改进遗传算法,有可能会得到意想不到的结果。

对上述问题的深入研究必将大大促进遗传算法理论和应用的发展,遗传算法也必将在智能计算领域中展现出更加光明的前景。

参考文献:

- [1] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Cambridge MIT Press 1975
- [2] 赵改善. 求解非线性最优化问题的遗传算法[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(1): 90-97.
- [3] 师汉民, 陈吉红. 基因遗传算法的原理及在机械工程中的应用[J]. 中国机械工程, 1992, 3(3): 18-21
- [4] STOFFA P L, SEN M K. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: inversion of plane-wave seismogram[J]. *Geophysics* 1991, 56(11): 1794-1810.
- [5] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 姜昌华. 遗传算法在物流系统优化中的应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007
- [7] PAN Zheng-jun, KANG Li-shan, NIE Si-xiang. Evolving both the topology and weights of neural network[J]. *Parallel Algorithms and Applications* 1996, 9(3&4): 299-307.
- [8] LOUIS J, RAWLINS G J E. Syntactic analysis of convergence in genetic algorithms[M] // *Foundations of Genetic Algorithms*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1993, 141-151
- [9] 夏虎, 庄健, 王立忠, 等. 一种考虑环境作用的协同免疫遗传算法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 80-84
- [10] 蔡良伟, 李霞. 遗传算法交叉操作的改进[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 925-928.
- [11] 江雷. 基于并行遗传算法的弹性 TSP 研究[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(8): 130-134
- [12] WHITLEY D, STRAKWEATHER T, BOGART C. Genetic algorithms and neural networks: optimizing connection and connectivity[J]. *Parallel Computing* 1990, 14(3): 347-361.
- [13] 贺新, 刘智明, 周激流. 基于主附种群结构的遗传算法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2003, 40(2): 278-282
- [14] 叶在福, 单渊达. 基于多种群遗传算法的输电系统扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 24-27.
- [15] 朱灿, 梁昔明, 颜东煌. 一种考虑性别特征的遗传算法[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 110-113, 128.
- [16] De JONG K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Michigan University of Michigan, 1975.
- [17] 一承民, 张传生, 刘贵忠. 利用正交试验法优化配置遗传算法控制参数[R]. 西安: 西安交通大学电子与信息工程学院信息工程研究所, 1996.
- [18] 李康顺, 李茂民, 张文生. 一种基于改进遗传算法的图像分割方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(11): 4364-4367
- [19] REYNOLDS R G, SVERDLIK W. Problem solving using cultural algorithms[C] // *Proc of International Conference on Evolutionary Computation* 1994: 645-650.
- [20] REYNOLDS R G, ZHU S. Knowledge-based function optimization using fuzzy cultural algorithms with evolutionary programming[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B* 2001, 31(1): 1-18
- [21] REYNOLDS R G, PENG B. Cultural algorithms: modeling of how cultures learn to solve problems[C] // *Proc of the 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004, 166-172
- [22] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 552-561.
- [23] JIAO Li-cheng, WANG Lei. A Novel genetic algorithm based on immunity[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans* 2000, 30(5): 552-561.
- [24] 朱灿, 梁昔明, 周书仁. 基于物种选择的遗传算法[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(3): 534-536
- [25] 周兰凤, 洪炳熔. 用基于知识的遗传算法实现移动机器人路径规划[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 911-914
- [26] GRÁLDEZ R, AGUILAR-RUIZ J S, RQUELME J C. Knowledge-based fast evaluation for evolutionary learning[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* 2005, 35(1): 1-7
- [27] HAGEMAN J A, WEHRENS R, SPRANGH A van, et al. Hybrid genetic algorithm-tabu search approach for optimizing multilayer optical coatings[J]. *Analytica Chimica Acta* 2003, 490(1-2): 211-222
- [28] 魏明, 蔡延光. 一种基于混沌领域搜索的自适应遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 464-465
- [29] 任子武, 伞冶. 实数遗传算法的改进及性能研究[J]. 电子学报, 2007, 35(2): 269-274.
- [30] YOGESWARAN M, PONNAMBALAM S G, TIWARIM K. An efficient hybrid evolutionary heuristic using genetic algorithm and simulated annealing algorithm to solve machine loading problem in FMS[J]. *International Journal of Production Research* 2009, 47(19): 5421-5448
- [31] OH S K, PEDRYCZ W, PARK H S. Genetically optimized fuzzy polynomial neural networks[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2006, 14(1): 125-144
- [32] KUMAR P, CHANDNA V K, THOMAS M S. Fuzzy-genetic algorithm for pre-processing data at the RTU[J]. *IEEE Transactions on Power Systems* 2004, 19(2): 718-723
- [33] MURATA T, MIYATA S. Gene linkage identification in permutation problems for local search and genetic local search[C] // *Proc of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* 2005, 1920-1924.
- [34] ZHANG Jun, HUANG De-shuang, LOK T M, et al. A novel adaptive sequential niche technique for multimodal function optimization[J]. *Neurocomputing* 2006, 69(16-18): 2396-2401
- [35] WANG Ling, TANG Fang, WU Hao. Hybrid genetic algorithm based on quantum computing for numerical optimization and parameter estimation[J]. *Applied Mathematics and Computation* 2005, 171(2): 1141-1156
- [36] LUO Xiao-ping, WEI Wei. Discussion on the convergence rate of immune genetic algorithm[C] // *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* 2004: 2275-2278.
- [37] CHANDRASEKHARAM R. Genetic algorithm for embedding a complete graph in a hypercube with a VLSI application[J]. *Microprocessing and Microprogramming* 1994, 40(8): 537-552
- [38] BOMMW L P van. Genetic algorithm for optimal logical database design[J]. *International Software Technology* 1994, 36(2): 725-732.
- [39] KARR C L. Design of an adaptive fuzzy logic controller using genetic algorithm[C] // *Proc of the 4th International Conference on Genetic Algorithms*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1991, 450-457
- [40] 景兴建, 土越超, 谈大龙. 理性遗传算法及其在多机器人运动防调中的应用[J]. 自动化学报, 2002, 28(6): 955-961.
- [41] FRED G, KELLY J P, LAGUNA M. Genetic algorithms and tabu search: hybrids for optimization[J]. *Computer and Operations Research* 1995, 122(1): 111-134.

- [42] M ICHALEW ICZ Z, JANIKOW C, KJRAW CZYK J A modified genetic algorithm for optimal control problems[J]. *Computers and Mathematical Applications* 1992, 23(12): 83-94.
- [43] DAVIS J J Training product unit neural network with genetic algorithms[J]. *IEEE Expert* 1993, 8(5): 26-33.
- [44] De JONG K A. Learning with genetic algorithms: an overview[J]. *Machine Learning* 1988, 3(2-3): 121-138.
- [45] DORIGO M, SCHNEH U. Genetic-based machine learning and behavior-based robotics: a new synthesis[J]. *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics* 1993, 23(1): 141-154.
- [46] BOOKER L B, GOLDBERG D E, HOLLAND J H. Classifier systems and genetic algorithms[J]. *Artificial Intelligence* 1989, 40(1): 235-282.
- [47] LEPINS G E, WANG L A. Classifier system learning of Boolean concepts[C] //Proc of the 4th International Conference on Genetic Algorithms. San Francisco Morgan Kaufmann, 1991: 318-323.
- [48] MCAULAY A D, OH J C. Improving learning of genetic rule-based classifier systems[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics* 1994, 24(1): 152-159.
- [49] MATWIN S, SZAPIRO T, HAIGH K. Genetic algorithms approach to a negotiation support system[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics* 1991, 21(1): 102-114.
- [50] NIKOLOPOULOS C, FELLRATH P. A hybrid expert system for investment advising[J]. *Expert Systems* 1994, 11(4): 245-250.
- [51] JENKINS W M. Structural optimization with the genetic algorithm[J]. *Structural Engineer* 1991, 69(24): 408-422.
- [52] GOLDBERG D E. Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithm and rule learning[D]. Michigan: University of Michigan, 1983.
- [53] DAVIS L. Handbook of genetic algorithms[M]. [S. l]: Van Nostrand Reinhold Company, 1991.
- [54] FORREST S. Genetic algorithm: principles of natural selection application to computation[J]. *Science* 1993, 261(5123): 872-878.
- [55] BAUER R J. Genetic algorithms and investment strategies[R]. New York Wiley, 1994.
- [56] M ICHALEW ICZ Z. Genetic algorithms+ data structures = evolution programs[M]. 3rd ed New York: Springer-Verlag, 1996.
- [57] MAHFOUD S W. Finite Markov chain models of an alternative selection strategy for the genetic algorithm[J]. *Complex Systems* 1993, 7(2): 155-170.
- [58] McCALLUM R A, SPACKMAN K A. Using genetic algorithm to learn disjunctive rules from examples[C] //Proc of International Conference on Machine Learning. San Mateo Morgan Kaufmann, 1990.
- [59] LAVINE B K. Pattern recognition analysis via genetic algorithms and multivariate statistical methods[M]. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2000.
- [60] WHITLEY L D. Foundations of genetic algorithms 2[M]. San Mateo Morgan Kaufmann, 1993.
- [61] WHITLEY L D, VOSE M D. Foundations of genetic algorithms 3[M]. San Francisco Morgan Kaufmann, 1995.
- [62] HAAS R, HUNT K J. Genetic algorithms-based optimization of a fuzzy-neural vehicle controller[C] //Proc of International Conference on Fuzzy Systems, 1994.
- [63] SCHAFFER J D, WHITLEY L D, ESHEIMAN L J. Combinations of genetic algorithms and neural networks: a survey of the state of the art[C] //Proc of International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, 1992: 1-37.
- [64] BALAJI De JONG K A, HAUNG J *et al*. Hybrid learning using genetic algorithms and decision trees for pattern classification[C] //Proc of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995: 19-25.
- [65] PAL S K. Genetic algorithms for pattern recognition[M]. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1996.
- [66] KADABA N, NYGARD K E, JUELL P J. Integration of adaptive machine learning and knowledge-based systems for routing and scheduling applications[J]. *Expert Systems with Applications* 1991, 2(1): 15-27.
- [67] 金菊良, 一品. 遗传算法及其在水科学中的应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000.
- [68] BERNDT D J, WATKINS A. Investigating the performance of genetic algorithm-based software test case generation[C] //Proc of the 7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering, 2004: 261-262.
- [69] ESPOSITO A, MARINARO M, ORICCHIO D, *et al*. Approximation of continuous and discontinuous mappings by a growing neural RBF-based algorithm[J]. *Neural Networks* 2000, 13(6): 651-665.
- [70] VESNI J M, GRATER R M. Model selection using a simplex reproduction genetic algorithm[J]. *Signal Processing* 1999, 78(3): 321-327.
- [71] RONESCA C M, FLEMMING P J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithm-part I: a unified formulation and part II: application example[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics Part A: Systems and Humans* 1998, 28(1): 26-37, 38-47.
- [72] 颜文俊, 张森林. 新型多目标优化控制策略及其应用研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(6): 691-696.
- [73] ZHONG Bing-lin, YAN Ting-hu, HUANG Ren *et al*. A genetic algorithm for diagnosis problem solving[C] //Proc of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway: IEEE Service Center, 1992.
- [74] DAVIDOR Y. Genetic algorithm and robotics: a heuristic strategy for optimization[M]. [S. l]: World Scientific Publishing Co., 1991.
- [75] LIN Jin-cheng, YE Hui-lin. Automatic test data generation for path testing using GAs[J]. *Information Sciences* 2001, 131(1-4): 47-64.
- [76] BERNDT D J, WATKINS A. Investigating the performance of genetic algorithm-based software test case generation[C] //Proc of the 8th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering, 2004: 261-262.
- [77] 许光宁, 肖志勇, 愈金寿. 应用自适应遗传算法解决集装箱装载问题[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1280-1283.
- [78] KARABULUT K, NCEOGLU M M. A hybrid genetic algorithm for packing in 3D with deepest bottom left with fill method[C] //Proc of the 3rd International Conference on Advances in Information Systems, 2004: 441-450.
- [79] SINGH A, BAGHEL A S. A new grouping genetic algorithm for the quadratic multiple knapsack problem[C] //Proc of the 7th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Berlin: Springer, 2007: 210-218.
- [80] ZHOU G, GEN M. Approach to degree-constrained minimum spanning tree problem using genetic algorithm[J]. *Engineering Design and Automation* 1997, 3(2): 157-165.

- [13] SARKAR N, CHAUDHURI B B. An efficient approach to estimate fractal dimension of texture images [J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25(9): 1035-1041.
- [14] PELEG I, NATO R, HARLEY R, *et al*. Multiple resolution textures analysis and classification [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1985, 6(4): 518-523.
- [15] 何四华, 杨绍清, 石爱国. 纹理高阶分形特征在海面舰船目标检测中的应用 [J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(4): 79-82.
- [16] 杜干, 张守宏. 高阶分形特征在雷达信号检测中的应用 [J]. *电子学报*, 2000, 28(3): 90-92.
- [17] TOLLE C R, McJUNKIN T R, ROHRBAUGH D T, *et al*. Lacunarity definition for ramified data sets based on optical cover [J]. *Physical D: Nonlinear Phenomena*, 2003, 179(3-4): 129-152.
- [18] 张坤华, 杨焯. 基于分形特征的复杂背景下扩展目标检测 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 217-220.
- [19] 章毓晋. 图像分割 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [20] PENG Zhen-ming, HUANG Bin. Detecting the man-made target based on enhanced fractal feature using PRIA [C] // *Proc of the 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics* 2006, 208-211.
- [21] CHENG Hui, BOUMAN C A. Multiscale Bayesian segmentation using a trainable context model [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(4): 511-525.
- [22] ANDREY P, TAROX P. Unsupervised segmentation of Markov model-based texture image in selectionist relaxation [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(3): 252-262.
- [23] KUMAR S, HEBERT M. Man-made structure detection in natural images using a causal multiscale random field [C] // *Proc of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2003: 119-126.
- [24] BOUMAN C A, SHAPIRO M. A multiscale random field model for Bayesian image segmentation [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1994, 3(2): 162-177.
- [25] LIS Z. Markov random field modeling in image analysis [M]. London: Springer-Verlag, 2001.
- [26] WON C S, DERIN H. Unsupervised segmentation of noisy and textured images using Markov random fields [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1992, 54(4): 308-328.
- [27] KUMAR S, HEBERT M. Discriminative fields for modeling spatial dependencies in natural images [C] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. Cambridge: MIT Press, 2003: 87-97.
- [28] RUBINSTEIN Y D, HASTIE T. Discriminative vs informative learning [C] // *Proc of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1997: 49-53.
- [29] MALIADI R, SETHIAN J A, VEMURI B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(2): 158-175.
- [30] 李俊, 杨新, 施鹏飞. 基于 Mumford-Shah 模型的快速水平集图像分割方法 [J]. *计算机学报*, 2002, 25(11): 1175-1183.
- [31] 王怡, 周明全, 耿国华. 基于简化 Mumford-Shah 模型的水平集图像分割算法 [J]. *计算机应用*, 2006, 26(8): 1848-1850.
- [32] CAO Guo, YANG Xin, MAO Zhi-hong. A two-stage level set evolution scheme for man-made objects detection in aerial images [C] // *Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005: 474-476.
- [33] OSHIER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulation [J]. *Journal of Computer Physics*, 1988, 79(1): 12-49.
- [34] GUBA S, RASTOGIR, SHIM K. ROCK: a robust clustering algorithm for categorical attributes [J]. *Information Systems*, 2000, 25(5): 345-366.
- [35] WU Ning-ning, ZHANG Jing. Factor analysis based anomaly detection and clustering [J]. *Decision Support Systems*, 2006, 42(1): 375-389.
- [36] PIRES A, SANTOS P C. Using clustering and robust estimators to detect outliers in multivariate data [C] // *Proc of International Conference on Robust Statistics*, 2005.
- [37] CARLOTTO M J A. cluster-based approach for detecting man-made objects and changes in imagery [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(2): 374-387.
- [38] STEN D, BEAVEN S, STOCKER A, *et al*. Anomaly detection from hyperspectral imagery [J]. *IEEE Signal Process*, 2002, 19(1): 58-69.
- [39] KANUNGO T, MOUNT D M, NETHAN S, *et al*. A local search approximation algorithm for K-means clustering [J]. *Computational Geometry*, 2004, 28(2-3): 89-112.
- [40] DEMSTER A P, LAIRD N M, RD N D B M. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1977, 39(1): 1-38.
- [41] TOU J T, GONZALEZ R C. Pattern recognition principles [M]. [S. l.]: Addison-Wesley, 1974.

(上接第 2429 页)

- [81] 黄德才, 郭海东. 基于 JII 的非等同并行多机调度问题的混合遗传算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(3): 298-302.
- [82] GEN M, LIY in-zhen. Spanning tree-based genetic algorithm for bicriteria fixed charge transportation problem [C] // *Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Washington DC: IEEE Computer Society, 1999: 2265-2271.
- [83] MUNETOMO M, TALA I Y, SATO Y. An adaptive network routing algorithm employing path genetic operators [C] // *Proc of the 7th Congress on Genetic Algorithms*, 1997: 643-649.
- [84] 乐艳丽, 鲁汉榕, 李加庆. 基于改进遗传算法求解旅行商问题 [J]. *空军雷达学院学报*, 2007, 21(4): 298-300.
- [85] 周文坤, 武振业, 鞠廷英. 多目标群体决策的 1 种综合集成方法 [J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(1): 100-103.
- [86] HAJELA P, LIN C Y. Genetic search strategies in multicriterion optimal design [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1992, 5(4): 99-107.
- [87] DEV K. Optimization for engineering design: algorithms and examples [M]. [S. l.]: Prentice-Hall, 1995.
- [88] STEUER R E. Multiple optimization criteria: theory, computation, and application [M]. New York: Wiley, 1986.
- [89] LETTAU M. Explaining the facts with adaptive agents: the case of mutual fund flows [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1997, 21(7): 1117-1147.
- [90] CHPPERFIELD A, FLEMING P J, ROHLHEM H, *et al*. Genetic algorithm toolbox for use with MATLAB [R]. Sheffield: Department of Automatic Control and System Engineering, University of Sheffield, 1994.