

文章编号: 1002-0411(2001)06-0531-06

遗传算法的现状与发展动向

张丽萍 柴跃廷

(清华大学自动化系 CIMS 中心 北京 100084)

摘 要: 遗传算法在许多优化问题中都有成功的应用,但其本身也存在一些不足.如何改善遗传算法的搜索能力和提高算法的收敛速度,使其更好地解决实际问题,是各国学者一直探索的主要课题之一.本文综述了遗传算法中编码表示、适应度函数、选择策略、控制参数和遗传算子等方面的各种改进措施,并给出了遗传算法的发展动向。

关键词: 遗传算法; 编码; 适应度函数; 选择策略; 遗传算子; 控制参数; 发展动向

中图分类号: TP13

文献标识码: A

ACTUALITY AND DEVELOPMENTAL TREND FOR GENETIC ALGORITHMS

ZHANG Li-ping CHAI Yue-ting

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Genetic algorithms have been successfully applied to a wide variety of problems. Although widely used, there are still some shortages. In order to effectively solve practical problems, the scholars all over the world have been exploring how to improve its searching performance and avoid the common defect of early convergence. This paper summed up 6 kinds of relevant improved methods and 5 new developmental trends concerning genetic algorithms.

Keywords: genetic algorithms, encoding, fitness, selection strategy, genetic operators, parameters, new trend

1 引言(Introduction)

近年来,遗传算法(GA)的卓越性能引起人们的关注.对于以往难以解决的函数优化问题,复杂的多目标规划问题,工农业生产中的配管、配线问题,以及机器学习,图象识别,人工神经网络的权系数调整和网络构造等问题,GA是最有效的方法之一.虽然GA在许多优化问题中都有成功的应用,但其本身也存在一些不足.例如局部搜索能力差、存在未成熟收敛和随机漫游等现象,从而导致算法的收敛性能差,需要很长时间才能找到最优解,这些不足阻碍了遗传算法的推广应用.如何改善遗传算法的搜索能力和提高算法的收敛速度,使其更好地应用于实际问题的解决中,是各国学者一直探索的一个主要课题.

2 遗传算法存在的问题及相应的改进措施 (GA's some shortages and corresponding

improved methods)

近年来有关遗传算法的期刊论文和会议论文每年都有数百乃至上千篇,这些文献主要都是从某个方面对遗传算法进行了不同形式的改进,然后对所作改进的机理进行了分析并且都有针对性的用于解决某类实际问题.下面从几个方面进行综述:

2.1 编码表示

Holland 在运用模式定理分析编码机制时,建议使用二进制编码,但二进制编码不能直接反映问题的固有结构,精度不高,个体长度大,占用计算机内存多.Gray 编码是将二进制编码通过一个变换进行转换得到的编码,其目的就是克服 Hamming 悬崖的缺点^[1].动态编码^[2](dynamic encoding)GA 是当算法收敛到某局部最优时增加搜索的精度,从而使得在全局最优附近可以进行更精确的搜索,增加精度的办法是在保持串长不变的前提下减小搜索

区域. 对于问题的变量是实向量的情形, 可以直接采用实数进行编码, 这样可以直接在解的表现型上进行遗传操作, 从而便于引入与问题领域相关的启发式信息以增加算法的搜索能力^[3,4]. 复数编码^[5]的 GA 是为了描述和解决二维问题, 基因用 $x + y_i$ 表示; 其还可以推广到多维问题的描述中. 多维实数编码^[6]GA, 使无效交叉发生的可能性大大降低, 同时其合理的编码长度也有助于算法在短时间内获得高精度的全局最优解. 在组合优化中, 可以使用有序串编码, 例如在文献[7]中用自然数编码巧妙地解决了 VRP 问题. 当问题的表示是树和图时, 我们还可以使用结构式编码.

2.2 适应度函数

适应度函数是用来区分群体中个体好坏的标准, 是自然选择的唯一标准, 选择的好坏直接影响算法的优劣. 引入适应值调节和资源共享策略可以加快收敛速度和跳出局部最优点. 对适应值进行调节就是通过变换改变原适应值间的比例关系, 常用的比例变换有线性变换、乘幂变换和指数变换等. 对于一个问题具体采用什么变换才能达到较优的效果, V. Kreinovich 等在文献[8]中做了较详细的讨论. 而在文献[9]中则是采用共享的技术, 对子群的形成和稳定起了一定作用, 文中主要用子群消失时间的近似形式估计 Sharing 的界. 文献[10]中采用了依据搜索进展可变的适应值函数, 并应用于 Cutting Problem 取得较好效果. 文献[11]中设计了自适应选取遗传算法的适应值函数的方法, 该方法的计算量要比排序选择操作的计算量小的多, 而且有效的避免了算法的非成熟收敛.

2.3 选择策略

优胜劣汰的选择机制使得适应值大的个体有较大的存活机会, 不同的选择策略对算法性能有较大的影响. 轮盘赌法是使用最多的选择策略, 但这种策略可能会产生较大的抽样误差, 于是对此提出了很多的改进方法, 如繁殖池选择^[12], Boltzmann 选择^[13]等等. 但是这几种策略都是基于适应值比例的选择, 常常会出现早熟收敛现象和停滞现象. 为此又提出了非线性排名选择^[3], 这种选择不仅避免了上述问题, 而且可以直接使用原始适应值进行排名选择, 而不需对适应值进行标准化; 但这种选择在群体规模很大时, 其额外计算量(如计算总体适应值和排序)也相当可观, 甚至在进行并行实现时有时要带来一些同步限制. 基于局部竞争机制的选择如 $(\lambda + \mu)$ 选择^[14], 它使双亲和后代有同样的生存竞争机会,

在一定程度上避免了这些问题. 在[15]中作者采用了类似梯度的方式来选择, 不仅使较差的染色体比较好的染色体得到更大的改进, 而且还不断产生新的个体, 从而不断拓展了新的搜索空间. [16]中作者引入了 Harvesting Strategies 来分析遗传算法的性能, Harvesting Strategies 是指在每一代交叉和突变后进行两次乃至多次筛选作为下面的群体. [17]中采用了 Disruptive Selection, 它吸收了优等和劣等个体, 实验结果表明了两极分化有可能更容易找到最优解. 为了提高种群的多样性, 提出一种基于免疫多样性的选择算子^[18], 该选择算子依赖于串的稠密度和适应值, 串的稠密度越大, 其保留下来的可能性越小, 具体事例证明改进算法是有效的.

2.4 控制参数

控制参数一般有群体大小, 交换概率, 变异概率等, 这些参数对遗传算法性能影响较大. 在标准的遗传算法中采用经验进行估计, 这将带来很大的盲目性, 而影响算法的全局最优性和收敛性. 目前许多学者意识到这些参数应该随着遗传进化而自适应变化, Davis 提出自适应算子概率方法^[19], 即用自适应机制把算子概率与算子产生的个体适应性结合, 高适应性值被分配高算子概率. Whitley 提出一种自适应突变策略与一对父串间的 Hamming 距离成反比^[20], 结果显示能有效地保持基因的多样性. 张良杰等通过引入 i 位改进子空间概念, 采用模糊推理技术来确定选取突变概率的一般性原则^[21]. 在文献[22]中设计了一种群体规模可变的遗传算法, 它提出每个个体应当有年龄及生命期的概念并淘汰年龄大于生命期的个体从而使遗传算法动态的控制了群体数目, 这种方法可以找出一个接近最小代价的遗传算法, 同时尽量将群体规模保持在现有水平, 防止群体规模的指数级增长, 以降低计算的开销. 丁承明等提出利用正交试验法去优化选取 GA 控制参数^[23], 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可搜索绝大部分参数组合空间, 而且还可以确定哪个参数对 GA 结果影响最显著, 然后有针对性地进行精确搜索, 从而使得 GA 参数问题得到圆满解决. 为保证种群的有用多样性, 提出动态群法^[24], 即当迭代到一定代数, 若目标函数的值相同, 则现存种群中的较差的 N 个染色体被随机产生的 N 个染色体代替, 使进化过程中不断有新个体引入. [25]中用模糊规则对选择概率和变异概率进行控制, 在线改变其值, 相应的算例表明, 有较好的性能.

2.5 遗传算子

基本遗传算法中采用单点交叉算子和简单的变异算子. 它们操作比较简单, 计算量小, 但是在使用过程中有很大的局限性, 例如: 由于单点交叉破坏模式的概率较小, 至使搜索到的模式数也较少, 使算法具有较低的搜索能力. Feng et al. 对多维连续空间的 GA 的杂交多样性进行了分析, 通过建立相应的数学模型, Feng 解释了在多维连续空间和大规模群体中使用均匀杂交算子^[26]是如何探索新的解空间区域. 为了使得变异能够根据解的质量自适应的调整搜索区域, 从而能较明显地提高搜索能力, 提出自适应变异算子^[27]. 为了保护适应值较高的模式, 提出自适应交叉和变异^[28], 如果遇到适应值较高的模式, 则通过随机引入模式外的位而进行保护. 为了克服早熟, 引入多种群 GA^[29], 不同种群赋以不同的控制参数, 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. 为了防止近亲繁殖, 扩大种群的多样性, 抑制超长个体的快速繁殖, 引进近亲繁殖算子, 两个个体是否为近亲可用基因片段的 Hamming 距离来判断, 距离越大, 则为近亲的可能越小; 为加强局部搜索能力, 增加漂移算子, 将染色体各基因片段的后二分之一的基因分别按一定的概率做 1 的随机漂移, 排位越后的基因漂移的概率越大, 由此产生一定数量的新个体, 用基因预选机制的小生境技术控制漂移方向^[30]. 因为格点法产生的点集能均匀地分布于搜索空间, 并且佳点又是最好的格点, 所以可以用数论中的佳点集理论设计交叉算子^[31], 结果表明它的搜索效果要比纯随机法好, 而且有效的避免早熟现象. 基于生物免疫性提出的免疫算子^[32], 能够明显抑制进化过程中的退化现象, 减轻 GA 后期的波动, 从而提高了搜索效率和收敛速度. [33]中提出的 SRM (self-reproduction) 算子增强了种群的多样性, CM (crossover and mutation) 算子促进了有利变异的增加, 从而使算法大大节省了存贮空间和运行时间. 采用“尺度收缩”策略的混沌变异算子^[34]能明显的改善群体平均适应值, 提高算法的性能, 是解决优化问题的有效方法.

2.6 综合方面

文献[35]中提出了可分解/可拼接 GA 编码, 并基于此编码分别在种群层次和基因层次发展了动态变异和动态选择操作, 这种方法很大程度上避免了早熟问题. 增强型 GA^[36]中, 引入了几个新算子和新的种群迁移策略, 并用其对模糊逻辑控制器进行设

计, 得到了便于理解的模糊集和模糊规则. 用小波分析中的多尺度分析对 GA 中的染色体进行多尺度分解, 这样分解后的染色体的长度变短, 基因交换、变异等遗传操作更为彻底, 有效的克服了基因丢失引起的早熟问题^[37]. 小生境技术不仅能够保证群体中解的多样性, 而且具有很强的引导进化能力, 所以小生境技术的引入, 提高了 GA 处理多峰函数优化问题的能力^[38]. 将模拟退火过程引入遗传算法^[39], 在优选交叉和变异个体的过程中加入一定的“扰动”, 以达到保持种群内位串的多样性和位串之间的竞争机制, 克服了算法易陷于极小点的问题, 使得搜索沿着全局最优方向进行. 广义遗传算法^[40], 它以多点突变操作为主, 以基因交叉操作为辅, 实现了从一个局部最优状态到另一个局部最优状态的转移, 使算法获得全局最优. 为了使 GA 用于约束优化, 提出一种非稳态罚函数 GA^[41], 非稳态罚函数是遗传代数的函数, 当代数增加时, 罚函数也随着增大, 同时给 GA 带来更多的选择压力, 促使 GA 找到可行解. 综合遗传算法的全局性和神经网络的并行快速性等特点, 提出的遗传神经网络算法^[42], 可克服遗传算法最终进化至最优解较慢和神经网络易陷入局部解的缺陷, 具有较好的全局性和收敛速度. 采用面向对象技术设计了面向对象遗传算法^[43], 这种方法改变了在传统的 GA 中各个函数之间只有参数的传递, 而没有代码的继承性的状况从概念上提高了软件的可重用性, 用户可以更方便的设计和实现自己的编码方案和遗传算子. 变异基遗传算法^[44], 采用变异算子进行局部优化搜索, 并利用随机初始化技术使算法在局部搜索能力提高的同时仍有可能寻找到全局最优解. 贪婪遗传算法^[45]用在二次分配问题中取得了较好的效果, 在该算法中引入了新的交叉算子和移民算子, 保证了种群的多样性; 并且通过比赛竞争使得各种群得到进化, 很好的解决了种群多样性及对个别好个体偏爱之间的矛盾.

3 遗传算法的发展动向(GA's developmental trends)

GA 在应用方面的丰硕成果, 使人们对它的发展前景充满信心. 其主要应用领域在于函数优化(非线性, 多模型, 多目标等), 机器人学(移动机器人路径规划, 关节机器人运动轨迹规划, 细胞机器人的结构优化等), 控制(瓦斯管道控制, 防避导弹控制, 机器人控制等), 规划(生产规划, 并行机任务分配等), 设计(VLSI 布局, 通信网络设计, 喷气发动机设计

等), 组合优化(TSP 问题, 背包问题, 图分划问题等), 图象处理(模式识别, 特征提取, 图象恢复等), 信号处理(滤波器设计等), 人工生命(生命的遗传进化等). 此外遗传算法的研究出现了几个引人注目的新动向:

3.1 基于遗传算法的机器学习

这一新的研究方向把遗传算法从历史离散的搜索空间的优化搜索算法扩展到具有独特的规则生成功能的崭新的机器学习算法. 这一新的学习机制对于解决人工智能中知识获取和知识优化精炼的瓶颈难题带来了希望. 遗传算法作为一种搜索算法从一开始就与机器学习有着密切联系. 分类器系统 CS-1 是 GA 的创立者 Holland 教授等实现的第一个基于遗传算法的机器学习系统. 分类器系统在很多领域都得到了应用. 例如, 分类器系统在学习式多机器人路径规划系统中得到的成功应用; Goldberg 研究了用分类器系统来学习控制一个煤气管道仿真系统; Wilson 研究了一种用于协调可移动式视频摄像机的感知—运动的分类器系统等. 分类器系统在基于遗传算法的机器学习研究中影响很大, 但具体实现方法和要解决的具体问题有关. 基于遗传算法的概念学习是近几年来机器学习领域的一个较为引人注目的研究方向, 由于概念学习隐含的搜索机制, 使得遗传算法在概念学习中有用武之地. 目前也有一些嵌入领域知识的基于遗传算法的机器学习的研究, 如将概念学习中特有的操作遗传操作化, 并显示出一定的优点. 此外, 学习分类系统的并行实现在基于遗传算法的机器学习研究中也占有相当的分量.

3.2 遗传算法与其他计算智能方法的相互渗透和结合

遗传算法正日益和神经网络、模糊推理以及混沌理论等其他智能计算方法相互渗透和结合, 必能达到取长补短的作用. 近年来在这方面已经取得不少研究成果, 并形成了“计算智能”的研究领域, 这对开拓 21 世纪中新的智能计算技术将具有重要的意义. GA 的出现使神经网络的训练(包括连接权系数的优化、网络空间结构的优化和网络的学习规则优化)有了一个崭新的面貌, 目标函数既不要求连续, 也不要求可微, 仅要求该问题可计算, 而且它的搜索始终遍及整个解空间, 因此容易得到全局最优解. GA 与神经网络的结合正成功的被用于从时间序列的分析来进行财政预算, 在这些系统中, 训练信号是模糊的, 数据是有噪声的, 一般很难正确的给出每个执行的定量评价, 如采用 GA 来学习, 就能克服这个

困难, 显著提高了系统的性能. Muhlenbein 分析了多层感知机网络的局限性, 并猜想下一代神经网络将会是遗传神经网络. 遗传算法还可以用于学习模糊控制规则和隶属度函数, 从而更好地改善模糊系统的性能. 文献[46]中将模糊逻辑、神经网络和遗传算法三者有机的结合起来应用于温室夏季温湿度控制中, 实验结果表明得到了良好的控制效果. 混沌表现出的随机性是系统内在的随机性, 被称为伪随机性, 它在生物进化中起着重要的作用, 是系统进化与信息之源. 混沌与遗传算法的结合已有人进行过尝试, 如吴新余等^[47]采用多种混沌模型构造随机开关, 以此控制交叉操作以改进 GA 的性能. 文献[34]中更加直接, 采用混沌序列构造变异算子, 为遗传算法的实现开辟了新的途径.

3.3 并行处理的遗传算法

并行处理的遗传算法的研究不仅是遗传算法本身的发展, 而且对于新一代智能计算机体系结构的研究都是十分重要的. GA 在操作上具有高度的并行性, 许多研究人员都正在探索在并行机上高效执行 GA 的策略. 近几年也发表了不少这方面的论文, 研究表明, 只要通过保持多个群体和恰当地控制群体间的相互作用来模拟并执行过程, 即使不使用并行计算机, 我们也能提高算法的执行效率. 在并行 GA 的研究方面, 一些并行 GA 模型已经被人们在具体的并行机上执行了; 并行 GA 可分为两类: 一类是粗粒度并行 GA, 它主要开发群体间的并行性, 如 Cohoon 分析了在并行计算机上解图划分问题的多群体 GA 的性能; 另一类是细粒度 GA, 它主要开发一个群体中的并行性, 如 Kosak 将群体中的每个个体映射到一个连接机的处理单元上, 并指出了这种方法对网络图设计问题的有效性.

3.4 遗传算法与人工生命的渗透

人工生命是用计算机、机械等人工媒体模拟或构造出的具有自然生物系统特有行为的人造系统. 人工生命与遗传算法有着密切的关系, 基于遗传算法的进化模型是研究人工生命现象的重要理论基础. 虽然人工生命的研究尚处于启蒙阶段, 但遗传算法已在其进化模型、学习模型、行为模型、自组织模型等方面显示出了初步的应用能力, 并且必将得到更为深入的应用和发展. 人工生命与遗传算法相辅相成, 遗传算法为人工生命的研究提供了一个有效的工具, 人工生命的研究也必将促进遗传算法的进一步发展.

3.5 遗传算法与进化规则及进化策略的结合

遗传算法、进化规则及进化策略是演化计算的三个主要分支, 这三种典型的进化算法都以自然界中生物的进化过程为自适应全局优化搜索过程的借鉴对象, 所以三者之间有一定的相似性; 另一方面, 这三种算法又是从不完全相同的角度出发来模拟生物的进化过程, 分别是依据不同的生物进化背景、不同的生物进化机制而开发出来的, 所以三者之间也有一些差异. 随着各种进化计算方法之间相互交流的深入, 以及对各种进化算法机理研究的进展, 要严格地区分它们既不可能, 也没有必要. 在进化计算领域内更重要的工作是生物进化机制, 构造性能更加优良、适应面更加广泛的进化算法.

4 结论(conclusion)

遗传算法作为一种非确定性的拟自然算法, 为复杂系统的优化提供了一种新的方法, 并且经过实践证明效果显著. 尽管遗传算法在很多领域具有广泛的应用价值, 但它仍存在一些问题, 各国学者一直在探索着对遗传算法的改进, 以使遗传算法有更广泛的应用领域. 本文详细综述了近年来对 GA 的各方面改进措施并给出了遗传算法的最新发展动向. 由于 GA 发展之迅速, 应用之广泛, 所以仍然有很多改进措施没有包括在文中.

参 考 文 献 (References)

- Mathias K E, Whitley L D. Transforming the Search Space with Gray Coding. In[48], 319~ 524
- Schraudolph N N, Belew R K. Dynamic Parameter Encoding for Genetic Algorithms. Machine learning . 1992, 9(1): 9~ 21
- Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs . Springer-Verlag, Berlin. 1992
- Wright A H. Genetic algorithms for Real Parameter Optimization. Foudation of Genetic Algorithms, Morgan kaufmann, San mateo, GA. 1991: 205~ 218
- 唐 飞, 滕弘飞, 刘 峻, 姜汉文. 带有能力约束的二维装填布局问题. 宇航学报. 2000, 21(2): 50~ 57
- 雷德明. 多维实数编码遗传算法. 控制与决策 . 2000, 15(2): 239 ~ 241
- 姜大立, 杨西龙. 车辆路径问题的遗传算法研究. 系统工程理论与实践. 1999, 19(1): 26~ 30
- Kreinovich V, Quintana C and Fuentes O. Genetic Algorithms - What Fitness Scaling is Optimal. Ctherm and System . 1993, 24(1) : 9~ 26
- S W Mahfoud. Genetic drift in sharing methods, 0- 7803- 1899 - 4/94, 1994 IEEE, 62~ 72
- V Petridis, S Kazarlis. Varying quality function ingenetic algorithms and the cutting problem. 0- 7803- 1899- 4/94, 1994 IEEE, 166~ 169
- 杨旭东, 张 彤. 遗传算法应用于系统在线辨识研究. 哈尔滨工业大学学报. 2000, 32(1): 102~ 105
- Back T, Hoffmeister F. Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms. in [49], 92~ 99, 1991
- Maza M D L, Tidor B. An Analysis of Selection Procedures with Particular Attention Paid to Proportion and Boltzmann Selection. In[50], 1993: 124~ 131
- Back T. Selection pressure in evolutionary algorithms: a Characterization of selection mechanisms. Proceeding of the First IEEE conference on Evolutionary computation, IEEE press, orlando, FL. 1994: 57~ 62
- D T Pham, G Jin. Genetic algorithm using gradient-like reproduction operator. Electronics Letters. 1995, 31(18): 1558~ 1559
- D Nover, S Baskaran P Schuster. Understanding genetic algorithms dynamics using harvesting strategies. Physics D 79. 1994: 132~ 145
- T Kao, S Y Hwang. A genetic algorithm with disruptive selection. IEEE T ransactions on System, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics. 1996, 26(2)
- Gao Feng, Shen Yapeng, Li Luxian. Optimal design of piezoelectric actuators for plate vibroacoustic control using genetic algorithms with immune diversity. Smart Materials and Structures 9 4 Aug 2000 IOP: 485~ 491
- Davis L. Adaptive Operator Probability in Genetic Algorithms. In Proc. 3rd Int Conf Genetic Algorithms. 1989: 61~ 69
- Whitley D, Starkweather D. Genetic II : A Distributed Genetic Algorithms. Expt J Theory, Art Intell, 1190, 2: 189~ 214
- 张良杰, 毛志宏, 李衍达. 遗传算法中突变算子的数学分析及改进策略. 电子科学学报. 1996, 18(6): 590~ 595
- Arabas J, Michalewicz Z and Mulawka J. GAVaPS-a Genetic Algorithms with Varying Population Size. Proc. Of the 1st IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'94). Orlando , Florida , USA, IEEE press, 1994, 1 , 73~ 78
- 丁承民, 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. 西安交通大学电子与信息工程学院信息工程研究所研究报告. 1996
- 张金奎, 林荫宇, 杨传忠, 甘兴国, 谢 科. 基于遗传算法的潮流多根求解方法. 重庆大学学报(自然科学版). 2000, 23(1): 56~ 59
- Liu Li, Chen Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering 20 2 Feb 2000: 66~ 69
- Feng Q X, Francesco P. Theoretical Analysis of Evolutionary Algorithms with an Infinite Population Size in Continuous Space Part I and II : Basic Properties of Selection and Mutation. IEEE Trans Neural Networks, 1994, 5(1): 102~ 129
- Pan Z J, Kang L S, Nie S X. Evolving Both the Topology and Weights of Neural Network. Parallel Algorithms and Applications . 1996, 9: 299~ 307
- 李献业, 钟绍春. 基于遗传算法的多代理规划优化方法. 东北师

- 大学学报(自然科学版). 2000, **32**(1): 1~ 5
- 29 叶在福, 单渊达. 基于多种群遗传算法的输电系统扩展规划. 电力系统自动化. 2000, **24**(5): 24~ 27
- 30 Xie Nan, Chen Ying-jun. Improving strategies on genetic algorithm and its application to the optimum design of bridges under earthquake. Gong Cheng Li Xue/Engineering Mechanics 17 3 2000 Tsinghua Univ 31~ 36
- 31 汪 珏, 张 铃. 用网格实现交叉操作的遗传算法. 计算机工程与科学. 2000, **22**(1): 18~ 20
- 32 Wang Lei, Jiao Licheng. Novel genetic algorithm based on immunity. Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems 5 May 28- May 31 2000 2000 Sponsored by: IEEE Circuits and Systems Society IEEE V-385~ V-388
- 33 Aguirre, Hernan (Shin-shu Univ), Tanaka, Kiyoshi | Sugimura, Tatsuo. Accelerated image halftoning technique using improved genetic algorithm. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences E83-A 8 Aug 2000 IEICE of Japan: 1566~ 1574
- 34 骆晨钟, 邵惠鹤. 采用混沌变异的进化算法. 控制与决策. 2000, **15**(9): 557~ 560
- 35 孙建永, 申建中等. 一类自适应遗传算法. 西安交通大学学报. 2000, (10): 84~ 89
- 36 Cheong, France (La Trobe Univ); Lai, Richard. Constraining the optimization of a fuzzy logic controller using an enhanced genetic algorithm. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics 30 1 2000 IEEE: 31~ 46
- 37 师学明, 王家映, 张胜业, 胡祥云. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料. 地球物理学报. 2000, **43**(1): 122~ 129
- 38 林 焰, 郝聚民, 纪卓尚. 隔离小生境遗传算法研究. 系统工程学报. 2000, **15**(1): 86~ 92
- 39 Yu, Hongmei; Yao, Pingjing. Combined genetic algorithm/simulated annealing algorithm for large scale system energy integration. Computers and Chemical Engineering 24 8 Sep 2000 Elsevier Science Ltd: 2023~ 2035
- 40 李 戈, 秦 权. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点. 工程力学. 2000, **17**(1): 25~ 34
- 41 朱学军, 王安麟, 张惠侨. 非稳态罚函数遗传算法及其用于机械/结构系统的健壮性设计. 机械科学与技术. 2000, **19**(1): 49~ 51
- 42 Li Q S, Liu D K, Zhang N. Modelling of structural response and optimization of structural control system using neural network and genetic algorithm. Structural Design of Tall Buildings 9 4 Sep 2000 John Wiley & Sons Ltd: 279~ 293
- 43 周 济, 罗应立, 张建华, 刘 连. 面向对象的遗传算法及其在神经网络辅助设计中的应用. 计算机工程与应用. 2000, **36**(2): 54~ 57
- 44 程翼宇, 刘 平. 基于变异学习的药物构效关系模式分类法. 浙江大学学报. 2000, **34**(2): 121~ 126
- 45 Ahuja, Ravindra K. Greedy genetic algorithm for the quadratic assignment problem. Computers and Operations Research 27 10 2000 Elsevier Science Ltd: 917~ 934
- 46 宫赤坤, 毛罕平. 温室夏季温湿度遗传模糊神经网络控制. 农业工程学报. 2000, **16**(4): 106~ 110
- 47 吴新余, 孙力娟. 改进交叉方式的遗传算法在求解通信网络优化问题中的应用. 通信学报. 1997, **18**(10): 15~ 21
- 48 Michalewicz Z, Schaffer J D, Schwefel H P, Fogel D B and Kitanoto H (Eds.). Proc. Of the 1st IEEE Int'l conf. on Evolutionary Computation (ICEC'94). Orlando, Florida, USA, IEEE Press, 1994
- 49 Belew R and Booker L (Eds.). Proc. Of the 4th Int'l Conf. on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, Los Altos. 1991
- 50 Forrest S (Eds.). Proc. Of the 5th Int'l Conf. on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, 1993

作者简介

张丽萍(1969-), 女, 硕士研究生. 研究领域为管理与决策.

柴跃廷(1964-), 男, 副教授. 研究领域为CIMS分析与设计、管理与决策、供需链、BRP等方面的研究、开发与应用.

(上接第 491 页)

- 3 Brown M, Harris C J. Neurofuzzy Adaptive Modeling and Control, 1997, Hemel Hempstead, V. K.: Prentice Hall
- 4 丛 爽, 李国栋. 自适应B样条模糊神经网络控制器的设计. 计算机工程与应用, 1999, 9: 66~ 68
- 5 J S Roger Jang, C T Sun. Functional Equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference system, IEEE Trans. on Neural Networks, 1993, **4**(1): 156~ 159, Jan
- 6 H Demuth, M Beale. Neural Network Toolbox User's Guide,

The MathWorks Inc, 1997

作者简介

丛 爽(1961-), 女, 博士, 教授. 研究领域为先进控制策略在运动控制中的应用与实现, 模糊控制, 神经网络控制, 变结构控制, 重复控制, B样条控制等. 发表学术论文 60 余篇, 在神经网络研究方面出版有《面向MATLAB工具箱的神经网络理论与应用》一书.