

# 遗传算法研究进展\*

马永杰, 云文霞

(西北师范大学 物理与电子工程学院 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 兰州 730070)

**摘 要:** 对遗传算法编码策略、遗传算子、参数确定、收敛性、欺骗问题等理论在国内外的研究现状进行了系统的研究, 并对遗传算法在国内外的研究进展和新的应用领域进行了讨论; 最后, 通过对近几年研究文献的统计分析, 探讨了遗传算法的研究热点和发展方向。

**关键词:** 遗传算法; 遗传算子; 收敛性; 约束; 多目标优化

中图分类号: TP18 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)04-1201-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.001

## Research progress of genetic algorithm

MA Yong-jie, YUN Wen-xia

(Key Laboratory of Atomic & Molecular Physics-Functional Materials of Gansu Province, College of Physics & Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** This paper studied the research status quo of main methods used in the theory of genetic algorithms such as coding strategies, genetic operators, parameters identification, convergence, deception problems at home and abroad, and discussed the research progress of genetic algorithm at home and abroad and the new application fields as well. Finally, it put forward the future research direction and research hotspot of the algorithm by analyzing papers in recent years.

**Key words:** genetic algorithm; genetic operators; convergence; constrained; multi-objective optimization

遗传算法是由美国的 Holland 教授于 1975 年在他的专著《自然界和人工系统的适应性》<sup>[1]</sup>中首先提出的, 它是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法。遗传算法模拟自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、交叉和基因突变现象, 在每次迭代中都保留一组候选解, 并按某种指标从解群中选取较优的个体, 利用遗传算子(选择、交叉和变异)对这些个体进行组合, 产生新一代的候选解群, 重复此过程, 直到满足某种收敛指标为止。与传统的启发式优化搜索算法相比, 遗传算法的主要本质特征在于群体搜索策略和简单的遗传算子。群体搜索使遗传算法得以突破领域搜索的限制, 可以实现整个解空间上的分布式信息采集和探索; 遗传算子仅仅利用适应度度量作为运算指标进行随机操作, 降低了一般启发式算法在搜索过程中对交互的依赖。

### 1 遗传算法理论研究进展

按照生物学上可进化性的概念, 遗传算法所追求的也是当前群体产生比现有个体更好个体的能力, 即遗传算法的可进化性或称群体可进化性。因此, 遗传算法的理论和研究方法围绕着这一目标展开。

#### 1.1 编码策略

编码是把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能处理的搜索空间的转换方法。在遗传算法编码方式的问题上, Holland 建议采用二进制编码, 并得到了许多学者的支

持。文献[2]提出了一种多目的进程调度的二进制编码遗传算法, 算法中只有一小部分二进制变量被选择编码成二进制染色体, 通过对关键产品、任务、单位的识别来实现。文献[3]提出了一种混沌 gray 编码方法。二进制编码的遗传算法进行数值优化时, 有精度不高的缺点, 实数编码对多参数优化问题有更好的性能。文献[4]在解空间通过反向变换将实数染色体映射到量子位, 采用量子位概率指导的实数交叉与混沌变异相结合进化染色体。虽然实数编码具有精度高、便于大空间搜索的优点, 但是只适用于连续变量问题。混合染色体编码方式<sup>[5]</sup>也是一种有效编码的方法。文献[6]将复数编码的思想应用到遗传算法中, 利用复数的模与实自变量对应, 以实部和虚部两个变量来表示一个自变量, 挖掘群体中个体的多样性, 减少局部收敛。文献[7]提出了动态相似度参数零件族编码, 该编码方法通过零件工艺相似性、零件自身相似基因比动态划分零件族, 大大减少了编码长度和求解时间。

#### 1.2 遗传算子

遗传算法的操作算子包括选择、交叉和变异三种基本形式, 构成了遗传算法强大搜索能力的核心, 是模拟自然选择和遗传过程中发生的繁殖、杂交和突变现象的主要载体<sup>[8]</sup>。

##### 1) 选择算子

选择操作体现适者生存的原理, 通过适应度选择优质个体而抛弃劣质个体, 其主要作用是避免基因缺失, 提高全局收敛性和计算效率。近年来不同的选择策略相继被提出。文献[9]提出一种新的选择策略, 即在选择过程中每一个体用一

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2011-12-27 基金项目: 甘肃省科技基金资助项目(096RJZA115); 甘肃省省属高校 2011 年度基本科研业务费专项资金项目

作者简介: 马永杰(1967-) 男, 甘肃灵台人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能控制、物流技术(myjmyj@163.com); 云文霞(1986-) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为遗传算法。

个由目标函数值、行为约束程度和行为约束数量组成的三维特征向量表示,为了在一些不可行解的邻近区域找到可行解,在选择算子中加入了局部搜索过程。文献[10]提出一种基于个体差异的局部竞争选择算子,通过保持种群的多样性增强了算法从局部最优中跳出的能力。文献[11]提出了基于竞争指数的模拟退火排序选择算子,该算子能够在有效避免早熟收敛的同时显著提高群体的搜索效率和稳定性。文献[12]中遗传算法使用一个确定性的选择算子应用于机组组合问题,在选择算子中种群的所有个体根据一个既定战略作为父代被选择。

### 2) 交叉算子

交叉能使个体之间的遗传物质进行交换从而产生更好的个体。文献[13]从解空间的角度分析了交叉算子的作用,提出了一种有向交叉遗传算子,通过优化控制交叉子代的落点位置,使交叉子代大概率地朝着最优解方向进化。文献[14]从拉普拉斯分布函数出发,设计了一种拉普拉斯交叉算子,使子代群体能自适应父代群体的变化。文献[15]为多模态连续函数优化提出了一种新的交叉方法,通过高斯分布的概率分布函数有效地调整实数编码交叉算子来生成不同的字符串。文献[16]为了确保产生可行解,采用了一种新的交叉算子,即单亲遗传操作。文献[17]将聚类融合引入到交叉算子中,通过扩展遗传算法中的两个体交叉操作,提出了基于聚类融合的多个体交叉算子。

### 3) 变异算子

变异能恢复个体失去的或未开发的遗传物质,以防止个体在形成最优解过程中过早收敛。文献[18]提出了一种基于功率分布的变异算子——功率变异算子;文献[19]针对连续函数优化问题,以实数编码为例,提出了一种有向的变异算子;文献[20]利用用户认知的不确定性设计定向变异算子,提高交互式遗传算法的性能;文献[21]提出了基于小波理论的小波突变。为提高遗传算法的性能,在已知的旅行商问题(TSP)中找到最短距离,文献[22]设计了一个新的变异算子——贪婪子巡回变异算子(GSTM),在新算子中存在两种不同的贪婪搜索方法和组件。

## 1.3 参数确定

在遗传算法运行过程中,存在着对其性能产生重大影响的一组参数,主要包括染色体位串长度 $l$ 、群体规模 $n$ 、交叉概率 $p_c$ 及变异概率 $p_m$ <sup>[8]</sup>。为了选择合适的 $n$ 、 $p_c$ 、 $p_m$ ,许多学者对此进行了系统的研究。文献[23]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。文献[24]利用云模型云滴的随机性和稳定倾向性特点,由条件发生器产生交叉概率和变异概率,其算法如下:

### 1) 自适应交叉概率 $p_c$ 新算法

$$\begin{aligned} Ex &= \bar{f} \\ En &= (f_{\max} - \bar{f}) / c_1 \quad //c_1 \text{ 为控制参数} \\ He &= En / c_2 \quad //c_2 \text{ 为控制参数} \\ En' &= \text{RANDN}(En, He) \end{aligned}$$

$$p_c = \begin{cases} k_1 e^{-\frac{(f' - Ex)^2}{2(En)^2}} & f' \geq \bar{f} \\ k_3 & f' < \bar{f} \end{cases}$$

### 2) 自适应变异概率 $p_m$ 新算法

$$\begin{aligned} Ex &= f \\ En &= (f_{\max} - f) / c_3 \quad //c_3 \text{ 为控制参数} \\ He &= En / c_4 \quad //c_4 \text{ 为控制参数} \end{aligned}$$

$$En' = \text{RANDN}(En, He)$$

$$p_m = \begin{cases} k_2 e^{-\frac{(f' - Ex)^2}{2(En)^2}} & f' \geq \bar{f} \\ k_4 & f' < \bar{f} \end{cases}$$

其中: $f_{\max}$ 为种群最大适应度 $\bar{f}$ 为平均适应度 $f'$ 为变异个体适应度 $f'$ 为交叉两个体适应度的较大值, $k_1 \sim k_4$ 为 $[0, 1]$ 内常数。

文献[25]在分析现有参数设定方法的基础上,将遗传算法参数设定问题描述为随机优化问题,并提出一种新的解决该问题的混合优化算法。Ponnambalam等人<sup>[26]</sup>针对调度问题通过大量比较实验估计最佳GA参数。文献[27]以Flow-Shop调度为算例对最佳参数和操作的确定问题进行了研究。文献[28]提出了基于信息熵的杂交概率计算方法,从杂交算子对种群新建和进化两个方面的作用来计算进化过程中的杂交概率。第 $t$ 代种群的杂交概率 $p_c$ 计算公式如下:

$$p_c = e^{-[\frac{D_t}{\max(D_t)} + 1 + \frac{E_t}{\max(E_t) + 1}]} \quad D_t \neq 0 \text{ 且 } E_t \neq 0$$

其中: $D_t$ 为种群方差, $E_t$ 为种群熵, $\max(D_t)$ 、 $\max(E_t)$ 分别为种群进化到第 $t$ 代时种群方差和种群熵的最大值。若 $D_t$ 或 $E_t$ 为零,则 $p_c = 0.8$ 。

文献[29]针对遗传算法的早熟问题对自适应遗传算法进行了研究,提出了一种新算法,以优势遗传的原则随个体适应度的变化而自适应地改变交叉和变异概率。

## 1.4 收敛性

对于优化问题求解的任何搜索算法而言,其收敛性具有重要的理论意义。因此,遗传算法的收敛性一直是理论研究的一个重要方面。近几年,在遗传算法全局收敛性的分析方面取得了突破,运用的工具主要是Markov链。文献[30]利用齐次有限Markov链证明了算法的全局收敛性。Rudolph<sup>[31]</sup>用齐次有限Markov链证明了带有选择、交叉、变异操作的经典遗传算法收敛不到全局最优解;但是,若在遗传算法中保留每一代的最优个体,则算法将收敛到全局最优解。文献[32]在解空间的分区基础上建立了二进制编码的有限群体的Markov链模型,可恰当地度量与精确刻画GA在不同实现下的收敛过程,并给出了一种新的有关遗传算法的收敛性理论,同时阐明了遗传算法产生早熟收敛现象的本质原因。文献[33]通过引入鞅方法,用下鞅理论证明了保留精英遗传算法(EGA)的全局收敛性,并给出了收敛速度与遗传操作参数的关系。文献[34]设计了具有全局搜索能力的遗传算法,并证明了算法的收敛性,给出了进化算法(EAs)以概率1收敛到问题的全局最优解的条件。文献[35]利用Markov链的一个特殊的minorization条件对 $n$ 进制编码的经典遗传算法的收敛速度上界进行了讨论,并得到如下主要结论:考虑 $n(\geq 2)$ 进制编码的经典遗传算法,种群大小 $N \geq 1$ ,编码长度 $l > 1$ ,变异概率 $p_m \in \{0, 1\}$ ,设种群的Markov链为 $\{X(k) \mid k \geq 0\}$ , $\pi_k$ 为第 $k$ 代种群 $X(k)$ 的概率分布,假设算法有稳态分布 $\pi$ ,有

$$\begin{cases} \|\pi_k - \pi\| \leq [1 - (\frac{np_m}{n-1})^{Nl}]^k & 0 < p_m \leq \frac{1}{l+1} \\ \|\pi_k - \pi\| \leq [1 - (\frac{n-np_m}{nl-l})^{Nl}]^k & \frac{1}{l+1} \leq p_m < 1 \end{cases}$$

文献[36]针对信赖域方法求解多峰值优化不能收敛到全局最优提出了一种新算法,并给出了算法收敛性的定义,即设 $\{f_i\}$ 是定义在可行域 $D$ 上的实值随机变量序列,称 $\{f_i\}$ 依概率收敛到 $f^*$ ,若对任意的 $\varepsilon > 0$ 有 $\lim_{l \rightarrow \infty} P\{|f_n - f^*| \leq \varepsilon\} = 1$ 。

### 1.5 欺骗问题

欺骗问题是遗传算法研究中的一个热点。文献[19]运用一种定向变异算子极大地提高了遗传算法解决连续型欺骗问题的能力;文献[37]讨论了一类遗传算法求解完全欺骗性问题的平均计算时间;文献[38]针对遗传算法欺骗问题的某些特点,提出了一种在遗传搜索过程中通过改变变异算子的方向和概率求解遗传算法欺骗问题的方法;文献[39]讨论了遗传算法的模式欺骗性和欺骗问题,给出了基于主竞争关系的模式欺骗性与GA欺骗问题的严格定义。分析了完全欺骗吸引子的特征,给出了形成完全欺骗问题的吸引子应满足的条件;然后讨论了GA欺骗性与隐含并行性、收敛性之间的关系。模式欺骗性与GA欺骗问题定义分别为:给定关联的主竞争关系模式集合 $H^{k_1}, H^{k_2} (k_1 < k_2)$ ,若 $H_0^{k_1} = \max(H^{k_1})$ ,  $H_0^{k_2} = \max(H^{k_2})$ ,但 $H_0^{k_2} \notin H_0^{k_1}$ ,则称从 $H^{k_1}$ 到 $H^{k_2}$ 存在着模式欺骗性,具有模式欺骗性的优化问题称为GA欺骗问题;若 $H_0^2 = \max(H^2) = "11***"$ ,  $H_0^3 = \max(H^3) = "000**"$ ,显然 $H_0^3 \notin H_0^2$ ,则从 $H^2$ 到 $H^3$ 存在着模式欺骗性,该问题即为GA欺骗问题。文献[40]以 $n$ -bit陷阱问题为例,研究了蚁群算法求解一阶欺骗性问题时的时间复杂度。

## 2 遗传算法的发展

自Holland教授首次提出遗传算法后,遗传算法作为求解问题的一类自组织与自适应的人工智能技术,被广泛研究和应用。随着应用领域的不断扩大和实际工程问题的复杂化,遗传算法逐渐显现出了一些不足和缺点,针对这些问题,一些改进的算法相继被提出。

### 2.1 保持物种多样性的遗传算法

文献[41]为保持个体间的多样性提出了一种基于多样化成长策略的遗传算法。基于信息熵度量多目标空间下群体的多样性,文献[42]提出一种保持群体多样性的多目标遗传算法。文献[43]针对多目标作业车间调度问题,提出了一种双种群遗传算法,该算法将正、逆序调度算法与生成调度活动的遗传算法有效地结合了起来。文献[44]在借鉴生物遗传学的基础上提出了一种多群体阶段性杂交遗传算法。文献[45]在种群进化进程中,根据采用一定方法能有效缩小搜索区域、动态改变种群规模的思想,提出了一种变搜索区域多种群遗传算法。文献[46]提出了一种基于熵的双群体遗传算法,通过提高初始化群体的熵值和保持进化过程群体的熵值,有效地保持了遗传群体的个体多样性。

### 2.2 多目标优化遗传算法

文献[47]在非劣分层遗传算法的基础上,提出了加入局部搜索的多目标遗传算法及适用于多目标优化的模拟退火局部搜索算法和跳转准则,弥补了遗传算法中局部搜索能力差、易早熟的缺点。文献[48]将任意多个目标函数的优化问题转换成两个目标函数的优化问题,并对转换后的优化问题设计了遗传算法。文献[49]通过在不同准则之间引入偏好来解决一些算法不能有效处理目标数目较多的优化问题,提出了一种多目标调和遗传算法(MOCGA)。文献[50]将随机逼近算法(SPSA)的快速局部优化方法与遗传算法的整体搜索策略结合起来,提出了一种解决多目标优化问题的随机梯度遗传算法。文献[51]提出了基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法

求解多目标优化问题的方法。

### 2.3 约束处理

为了给一般的非线性双层规划问题提供一种简单易操作的有效算法,文献[52]提出了基于插值的解非线性双层规划的遗传算法。文献[53]为了在非凸非线性规划问题中获得全局最优解,提出了一种新技术,通过变量的上下界将主要问题分成若干子问题,减少种群规模,从而在合理的时间内达到全局最优。文献[54]提出了一种新的遗传算法解决约束优化问题。文献[55]提出了一种基于物种选择的遗传算法,通过缩小最优种群约束边界来提高局部搜索速度,并提出了一种新的惩罚因子计算法,即

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\frac{1}{p_1} \sum_{x \in \Gamma} f(x) - \frac{1}{p - p_1} \sum_{x \notin \Gamma} f(x)}{\frac{1}{p - p_1} (\sum_{x \in \Gamma} (g_i(x) + \sum_{i=m+1}^l |h_i(x)|))} & p_1 > 0, 1p \\ \frac{\text{std}(f(x))}{\text{std}(\sum_{i=1}^m (g_i(x) + \sum_{i=m+1}^l |h_i(x)|))} & x \notin \Gamma, p_1 \leq 0, 1p \end{cases}$$

其中:种群个数为 $p$ ,可行点个数为 $p_1$ ,则不可行点个数为 $p - p_1$ ;可行域标记为 $\Gamma$ ,标准差函数为 $\text{std}$ ,通过采用两次计算惩罚因子的办法来处理约束条件。

文献[56]结合遗传算法和自组织迁移算法的特点,提出了一种自组织迁移遗传算法求解约束优化,使用惩罚函数来处理选择操作,惩罚函数如下:

$$\psi(x) = \sum_{m=1}^M [h_m(x)]^2 + \sum_{k=1}^K G_k [g_k(x)]^2$$

其中: $G_k$ 为海维赛德算子。

文献[57]为处理约束问题,在遗传算法中采用了不需要任何惩罚参数的小生境惩罚方法,惩罚计算如下:

$$F(x) = \begin{cases} f(x) & g_j(x) \geq 0, \forall j \in J \\ f_{\max} + \sum_{j=1}^J \langle g_j(x) \rangle & \text{其他} \end{cases}$$

其中: $f_{\max}$ 是种群中所有可行解的最大函数值。在锦标赛选择算子中执行共享策略。

### 2.4 小生境遗传算法

文献[58]提出了一种基于社团划分的小生境遗传算法,运用GN算法划分超级个体关系网以获取生境,并提取生境中共有模式。文献[59]提出了一种面向多模态函数优化的自适应小生境遗传算法,通过引入小生境熵来度量种群多样性,并利用小生境熵自适应调整进化参数取值;同时为了提高算法的全局搜索能力和局部收敛速度,在识别出的小生境范围内进行境外、境内交叉。文献[60]提出了一种解决连续多模态优化问题的小生境混合遗传算法,将小生境技术和Nelder-Mead的单一方法有机地融合在遗传算法中,加强了算法的搜索能力。

### 2.5 混合算法

混合遗传算法的实质是将不同算法的优点有机结合,改善单纯GA的性能。基于量子位的混沌特性和相干特性,文献[4]提出了一种实数编码混沌量子遗传算法(RCQGA)。文献[61]通过将量子位染色体转换成可变界线编码的染色体,提出了一种新的量子遗传算法。文献[36]将遗传算法与信赖域方法有机结合,提出了一种信赖域遗传算法,改变了信赖域方法求解多峰值优化不能收敛到全局最优的问题,对接近二次函数的优化问题具有较强的优势。文献[62]在标准遗传算法的

基础上,通过改进选择概率提出了一种自适应退火遗传算法。结合蚁群算法很强的局部收敛能力和遗传算法快速的全局搜索能力,文献[63]提出了一种带有参数自适应调节能力的混合算法。文献[64]结合模糊推理、模拟退火算法和自适应机制,提出了一种模糊自适应模拟退火遗传算法(FASAGA)。文献[65]在分析柔性作业车间调度问题特性的基础上,在文化算法的知识源中引入遗传算法,提出了一种采用主群体空间和信仰空间的双层进化结构的调度算法。文献[66]提出了一种基于结合神经网络和遗传算法的混合优化算法,在算法中,反向传播神经网络被用于改善遗传算法在寻找全局最优时的收敛性。

基因表达式编程(gene expression programming, GEP)<sup>[67]</sup>是在继承和发扬遗传算法与遗传编程(genetic programming, GP)优点的基础上发展起来的进化计算家族中的新成员,其结合了遗传算法的简单线性染色体思想和GP中使用的大小和形状不同的分叉结构思想。文献[68]为保持种群的多样性,采用了基因空间均匀分布策略、自适应交叉和变异算子以及淘汰算子等方法,提出了一种基于多样化进化策略的基因表达式编程算法DS-GEP。文献[69]通过引入同源基因和细胞系统思想,提出了一种基于多细胞基因表达式编程的函数优化新算法,以求解函数优化问题。

## 2.6 改进的遗传算法

受蜜蜂繁殖进化方式的启发,文献[30]提出了一种新型的遗传算法——蜜蜂进化型遗传算法(BEGA)。文献[70]通过借鉴遗传算法的思想,利用云模型云滴的随机性和稳定倾向性的特点提出了云遗传算法(CGA)。文献[71]根据元胞个体密度与分布的演化规则,提出了具有演化规则的元胞遗传算法(CEGA)。文献[72]提出了一种自组织遗传算法来优化PID控制器的参数,提高了标准遗传算法的全局搜索效率,避免了早熟收敛。文献[73]通过分析现存遗传算子的不足和生物进化的基本特征,设计了一种智能仿生遗传算法。由于简单遗传算法在解决复杂优化问题时速度慢、易陷入局部收敛,文献[74]提出了一种逐渐减少优化搜索范围的改进遗传算法。

## 2.7 新型算法

文献[75]结合遗传算法、关系网模型提出了一种基于智能体的多目标社会进化算法求解多目标优化问题。文献[76]针对二进制编码方式设计了族群分类方法,并在该族群结构的基础上形成了具有双轨协同进化特征的族群进化算法以及相应的族群算子。文献[77]基于种群中适应度较高的个体对种群的进化有推动作用这一思想,提出了一种适用于求解约束优化问题的M-精英协同进化算法(MECA),该算法能够将全局搜索与局部搜索有效地结合起来,因此具有更强的搜索能力。文献[78]提出了一种求解无约束优化问题的知识进化算法(UOP-KEA),解决了传统求解无约束优化问题方法的随机盲目性和易陷入局部最优值等缺陷。

## 3 遗传算法的应用

遗传算法作为一种有效的全局搜索方法,其应用领域已渗透到许多学科,如函数优化、组合优化、生产调度、自动控制、机器学习、图像处理、人工生命、遗传编程、机器学习、数据挖掘等<sup>[79]</sup>,同时应用实践又促进了遗传算法的发展和完善。目前,

遗传算法在一些新的领域迅速发展。

文献[80]利用混合遗传算法、神经网络的方法预测位于阿瓦士的曼苏里班吉斯坦油田的渗透率。算法把基于BP梯度算法的局部搜索能力和遗传算法的全局搜索能力有效地结合起来,遗传算法用于决定梯度下降算法的初始权值,因此所有的初始权值都能够被搜索到。

多项目资源能力平衡问题(RLPMP)是一类典型的NP-hard组合优化问题,为了得到更有效的优化方法,文献[81]提出了一种基于遗传算法的快速全局搜索能力和蚁群算法的正反馈收敛机制的CGAA求解方法。算法首先将具有强约束条件的RLPMP转换为组合优化的最短路径问题,采用遗传算法生成初始解,将其转换为CA所需的初始信息素分布,然后利用CA求得最优解。

太阳能光热发电技术是一种采用可再生能源来发电的具有吸引力的新技术。其中,太阳能集热器的面积、储热器的容量、辅助系统的功率影响着发电厂的性能。因此,文献[82]利用遗传算法对以上三个影响太阳能光热发电厂性能的组成部分进行了优化,以产生最大的年利润。

## 4 当前研究热点

本文在前人研究的基础上,分析了2008—2010年三年内遗传算法研究方面发表在EI源刊上的文章分布情况,分别从研究内容和应用领域两个方面进行了统计,结果如图1所示。

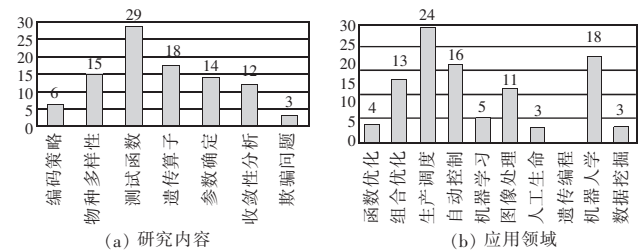


图1 遗传算法研究对比分析

由图1可以得到如下结论:a)从研究内容来看,涉及物种多样性、测试函数、遗传算子、参数确定等研究内容的文章占据较大数量;b)从应用领域来看,针对遗传算法在生产调度及机器人学方面进行研究的文章占多数,在自动控制、组合优化和图像处理方面的研究也占很大一部分比例。有关遗传算法在函数优化、机器学习、人工生命、数据挖掘及遗传编程方面研究所涉及的文章不是很多。

文献[79]通过对2002—2006年国内学者及工程技术人员在遗传算法方面的研究情况进行对比分析得出,遗传算法在函数优化和组合优化方面进行研究的文章每年几乎都是最多的,而生产调度及自动控制等实际应用领域的研究成果较少。遗传算法在数据挖掘和机器学习领域进行研究的文章不多,但在研究成果中所占的比重逐年增长。

结合以上对比分析可知,遗传算法在函数优化及组合优化方面的研究在减少,尤其在函数优化方面减少更明显,但是在生产调度及自动控制等领域的研究比重明显增加,这充分说明遗传算法的研究已经从理论方面逐渐转向应用领域;机器人学及图像处理也在逐渐成为研究的热点。涉及数据挖掘研究方面的文章不是很多,但随着数据挖掘技术的广泛应用,遗传算法在数据挖掘领域的研究会成为新的热点。

多智能体进化<sup>[83]</sup>、免疫进化计算、粒子群遗传算法是这几

年研究比较多的题目,对传统遗传算子(选择、交叉、变异)的改进也是讨论比较多的话题。随着应用的不断深入,遗传算法在优化多峰问题时的不足逐渐暴露出来。小生境作为优化多峰问题的一种有效手段,得到了广泛关注,并已经成为遗传算法领域的一个研究热点。协同进化算法是在进化算法的基础上,通过考虑种群与环境之间、种群与种群之间在进化过程中的协调关系提出的一类新的进化算法,目前遗传算法已经成为当前进化计算的一个热点问题<sup>[77-84]</sup>。

## 5 结束语

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,在许多学科领域具有广泛的应用价值。但有关算法的研究,对已经研究较为深入的热点关注度较高,而对潜在研究热点和迅速发展起来的研究热点关注度不足。综观遗传算法在算法改进及应用方面的研究现状,它已经成为目前计算智能领域的热点之一。但是还有一些不足,总体而言,以下几方面的工作尤其值得进一步探讨:

a) 遗传算法与优化技术的融合。对遗传算法的大范围群体搜索性能与快速收敛的局部优化方法进行混合,从而产生有效的全局优化方法。这种策略可从根本上提高遗传算法计算性能,对此可以进行大量的理论分析和实验。

b) 算法的改进以及新型算法的提出。遗传算法虽然是一种有效的全局搜索方法,但它在理论和应用研究上也存在着许多不足和缺陷。针对具体的研究和工程应用,对算法进行改进是很有必要的。虽然遗传算法执行方便,但是参数的选择仍然因问题不同而有所变化。如何合理地选择参数,仍然没有统一的选择方法。针对某一类问题,研究参数设定数目更少或不需要参数设定的算法,是目前研究关注的方向之一。

c) 混合遗传算法。其实质是将不同算法的优点有机结合,改善单纯遗传算法的性能。遗传算法也有其自身的缺点,如容易产生早熟收敛、收敛速度慢、局部寻优能力较差等。而梯度法、爬山法、模拟退火算法、禁忌搜索算法等一些启发式搜索算法具有较强的局部搜索能力。结合不同算法的寻优思想对遗传算法进行改进,构成一种混合式遗传算法以提高单纯遗传算法的运行效率和求解质量也是今后的一个研究热点。目前,遗传算法已经与蚁群算法<sup>[63]</sup>、模拟退火<sup>[64]</sup>、文化算法<sup>[65]</sup>等有效结合。

d) 算法的并行化研究。遗传算法的群体适应度评价、随机搜索等特征使其具有明显的并行性。因此,设计各种并行执行策略、建立相应的并行化遗传算法的数学基础,是一项具有重要意义的工作。

e) 加强遗传算法与应用的结合。根据不同的工程求解问题,进一步改进和完善遗传算法,使其在应用领域发挥更大的作用。

f) 面向多目标优化、约束优化问题的算法及理论研究。

## 参考文献:

- [1] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [2] HE Yao-hua, HUI Chi-wai. A binary coding genetic algorithm for multi-purpose process scheduling: a case study[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(16): 4816-4828.
- [3] YANG Xiao-hua, YANG Zhi-feng, YIN Xi-nan, et al. Chaos gray-coded genetic algorithm and its application for pollution source identifications in convection-diffusion equation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2008, 13(8): 1676-1688.
- [4] 陈辉, 张家树, 张超. 实数编码混沌量子遗传算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(11): 1300-1303.
- [5] LIN Yung-chien, HWANG K S, WANG Feng-sheng. A mixed-coding scheme of evolutionary algorithms to solve mixed-integer nonlinear programming problems[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2004, 47(8-9): 1295-1307.
- [6] 郑朝晖, 张焱, 袁聿皇. 一种基于复数编码的遗传算法[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 97-100.
- [7] 梁旭, 王佳, 黄明. 解决大规模生产调度问题的一种新编码方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 1974-1982.
- [8] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] TANG Ke-zong, SUN Ting-kai, YANG Jing-yu. An improved genetic algorithm based on a novel selection strategy for nonlinear programming problems[J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(4): 615-621.
- [10] 乔家庆, 付平, 孟升卫. 基于个体差异的遗传选择算子设计[J]. 电子学报, 2006, 34(12A): 2414-2416.
- [11] 陈皓, 崔杜武, 严太山, 等. 基于竞争指数的模拟退火排序选择算子[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 586-591.
- [12] BORIS P L, JESSICA S C. A deterministic annular crossover genetic algorithm optimisation for the unit commitment problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 6523-6529.
- [13] 范青武, 王普, 高学金. 一种基于有向交叉的遗传算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 542-546.
- [14] KUSUM D, MANOJ T. A new crossover operator for real coded genetic algorithms[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(1): 895-911.
- [15] NEDIM T. Optimization of multimodal continuous functions using a new crossover for the real-coded genetic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8172-8177.
- [16] WANG Lei, TANG Dun-bing. An improved adaptive genetic algorithm based on hormone modulation mechanism for Job-Shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 7243-7250.
- [17] 何东晓, 周棚, 王佐, 等. 复杂网络社区挖掘——基于聚类融合的遗传算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1160-1170.
- [18] KUSUM D, MANOJ T. A new mutation operator for real coded genetic algorithms[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 193(1): 211-230.
- [19] 陈峰, 武小悦. 基于定向变异算子的求解 GA 欺骗问题研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 204-207.
- [20] 巩敦卫, 郝国生, 严玉若. 交互式遗传算法基于用户认知不确定性的定向变异[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 74-78.
- [21] LING S H, LEUNG F H F. An improved genetic algorithm with average-bound crossover and wavelet mutation operations[J]. Soft Computing, 2007, 11(1): 7-31.
- [22] MURAT A, NOVRUZ A. Development a new mutation operator to solve the traveling salesman problem by aid of genetic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 1313-1320.
- [23] LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the Chinese



- Society of Electrical Engineering 2000 20(2):66-69.
- [24] 戴朝华,朱云芳,陈维荣.云自适应遗传算法[J].控制理论与应用,2007,24(4):646-650.
- [25] 闫利军,李宗斌,杨晓春.基于混合优化算法的遗传算法参数设定研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(10):1753-1756.
- [26] PONNAMBALAM S G, JAWAHAR N, KUMAR B S. Estimation of optimum genetic control parameters for Job-Shop scheduling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2002, 19(3):224-234.
- [27] WANG Ling, ZHENG Da-zhong. An effective hybrid heuristic for flow shop scheduling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2003 21(1):38-44.
- [28] 李慧贤,庞辽军,蔡晓东.基于信息熵对遗传算法中杂交概率的研究[J].系统工程与电子技术,2009,31(7):1743-1745.
- [29] 陈世哲,刘国栋,浦欣,等.基于优势遗传的自适应遗传算法[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(7):1021-1024.
- [30] 孟伟,韩学东,洪炳镨.蜜蜂进化型遗传算法[J].电子学报,2006,34(7):1294-1300.
- [31] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Neural Networks,1994,5(1):96-101.
- [32] 于志刚,宋申民,段广仁.遗传算法的机理与收敛性研究[J].控制与决策,2005,20(9):971-980.
- [33] 喻寿益,邝溯琼.保留精英遗传算法收敛性和收敛速度的新方法分析[J].控制理论与应用,2010,27(7):843-848.
- [34] 马永杰,马义德,蒋兆远,等.一种快速遗传算法及其收敛性[J].系统工程与电子技术,2009,31(3):714-718.
- [35] 明亮,王宇平. $n$ 进制编码遗传算法的收敛速度[J].系统工程理论与实践,2006,26(3):88-93.
- [36] 张晓伟,刘三阳.一种信赖域遗传算法[J].系统工程与电子技术,2007,29(8):1377-1380.
- [37] 何军,黄厚宽,康立山.遗传算法求解完全欺骗性问题的平均计算时间[J].计算机学报,1999,22(9):999-1003.
- [38] 黄炎,蒋培,王嘉松,等.基于可调变异算子求解遗传算法的欺骗问题[J].软件学报,1999,10(2):216-219.
- [39] 李敏强,寇纪淦.遗传算法的模式欺骗性分析[J].中国科学(E辑),2002,32(1):95-102.
- [40] 陈峻,孙海鹰.蚁群算法一阶欺骗性问题的时间复杂度分析[J].模式识别与人工智能,2010,23(1):1-6.
- [41] 袁煜明,范文慧,杨雨田,等.一种基于多样化成长策略的遗传算法[J].控制与决策,2009,24(12):1801-1804.
- [42] 申晓宁,郭毓,陈庆伟,等.一种保持群体多样性的多目标遗传算法[J].控制与决策,2008,23(12):1435-1440.
- [43] 王伟玲,李俊芳,王晶.求解多目标作业车间调度问题的双种群遗传算法[J].计算机集成制造系统,2011,17(4):808-815.
- [44] 董安邦,李军军,王嵩.多群体阶段性杂交遗传算法[J].西安交通大学学报,2004,38(2):128-131.
- [45] 巩敦卫,孙晓燕.变搜索区域多种群遗传算法[J].控制理论与应用,2006,23(2):256-260.
- [46] 杨小芹,黎明,周琳霞.基于熵的双群体遗传算法研究[J].模式识别与人工智能,2005,18(3):286-290.
- [47] 王小刚,梁仕贤,王福利.加入局部搜索的非劣分层多目标遗传算法[J].东北大学学报:自然科学版,2007,28(7):921-924.
- [48] 刘淳安,王宇平.基于新模型的多目标遗传算法[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2005,32(2):260-267.
- [49] 崔逊学,林闯.一种基于偏好的多目标调和遗传算法[J].软件学报,2005,16(5):761-770.
- [50] 李秀娟.求解多目标优化问题的随机梯度遗传算法[J].南京航空航天大学学报,2003,35(4):455-458.
- [51] 祁荣宾,钱锋,杜文莉,等.基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法[J].控制与决策,2007,22(2):164-168.
- [52] 李和成,王宇平.一个基于插值的解非线性双层规划的遗传算法[J].计算机学报,2008,31(6):910-918.
- [53] ARYANEZHAD M B, HEMATI M. A new genetic algorithm for solving nonconvex nonlinear programming problems [J]. Applied Mathematics and Computation 2008, 199(1):186-194.
- [54] TSOULOS I G. Solving constrained optimization problems using a novel genetic algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009 208(1):273-283.
- [55] 梁昔明,朱灿,颜东煌.基于物种选择的遗传算法求解约束非线性规划问题[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(1):185-189.
- [56] KUSUM D, DIPTI. A self-organizing migrating genetic algorithm for constrained optimization [J]. Applied Mathematics and Computation 2008, 198(1):237-250.
- [57] KALYAMOY D, SAMIR A. A niched-penalty approach for constraint handling in genetic algorithms [C]//Proc of International Conference on Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. 1999:235-243.
- [58] 祝希路,王柏.一种基于社团划分的小生境遗传算法[J].控制与决策,2010,25(7):1113-1116.
- [59] 陆青,梁昌勇,杨善林,等.面向多模态函数优化的自适应小生境遗传算法[J].模式识别与人工智能,2009,22(1):91-100.
- [60] WEI Ling-yun, ZHAO Mei. A niche hybrid genetic algorithm for global optimization of continuous multimodal functions [J]. Applied Mathematics and Computation 2005, 160(3):649-661.
- [61] XIONG He-gen, TANG Qiu-hua, XIONG Kai. A novel variable-boundary-coded quantum genetic algorithm for function optimization [C]//Proc of the 8th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Washinton DC: IEEE Computer Society 2009:279-285.
- [62] 黄宜军,章卫国,刘小雄.一种新的自适应退火遗传算法[J].西北工业大学学报,2006,24(5):571-575.
- [63] 牟峰袁,晓辉,王慈光,等.基于灰预测和正态云的参数自适应蚁群遗传算法[J].控制理论与应用,2010,27(6):701-707.
- [64] 彭勇刚,罗小平,韦巍.一种新的模糊自适应模拟退火遗传算法[J].控制与决策,2009,24(6):843-848.
- [65] 李铁克,王伟玲,张文学.基于文化遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J].计算机集成制造系统,2010,16(4):861-866.
- [66] JAVADI A A, FARMANI R, TAN T P. A hybrid intelligent genetic algorithm [J]. Advanced Engineering Informatics, 2005, 19(4):255-262.
- [67] FERREIRA C. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems [J]. Complex Systems 2001, 13(2):87-129.
- [68] 吴江,李太勇,姜玥,等.基于多样化进化策略的基因表达式编程算法[J].吉林大学学报:信息科学版,2010,28(4):396-403.
- [69] 彭昱忠,元昌安,陈建伟,等.多细胞基因表达式编程的函数优化算法[J].控制理论与应用,2010,27(11):1585-1589.
- [70] 戴朝华,朱云芳,陈维.云遗传算法[J].西南交通大学学报,2006,41(6):729-732.
- [71] 鲁宇明,黎明,李凌.一种具有演化规则的元胞遗传算法[J].电子学报,2010,38(7):1603-1607.
- [72] ZHANG Jin-hua, ZHUANG Jian, DU Hai-feng, et al. Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers [J]. Information Sciences 2009, 179(7):1007-1018.
- [73] LI Fa-chao, XU Li-da, JIN Chen-xia, et al. Intelligent bionic genetic algorithm (IB-GA) and its convergence [J]. Expert Systems with Applications 2011, 38(7):8804-8811.

(下转第1210页)

- nal of Computational Physics ,1988 ,79( 1) : 12-49.
- [6] OSHER S ,SHU C W. High-order essentially nonoscillatory schemes for Hamilton-Jacobi equation [J]. *SIAM Journal of Numerical Analysis* ,1991 ,28( 4) : 907-922.
- [7] OSHER S ,SETHIAN J A. Level set methods and dynamic implicit surfaces [M]. New York: Springer-Verlag ,2002: 22-414.
- [8] GIGA Y. Surface evolution equation: a level set method [M]. [S. l. ]: Birkhäuser Basel ,2002: 56-85.
- [9] WASILEWSKI M. Active contours using level sets for medical image segmentation [D]. Waterloo: University of Waterloo ,2004.
- [10] ADALSTEINSSON D ,SETHIAN A J. A fast level set method for propagating interfaces [J]. *Journal of Computational Physics* ,1995 ,118( 2) : 269-277.
- [11] SETHIAN J. Level set methods and fast marching methods [M]. Cambridge: Cambridge University Press ,1999.
- [12] ZHAO Hong-kai. Fast sweeping method for Eikonal equations [J]. *Math Computation* ,2005 ,74( 9) : 603-627.
- [13] CASELLES V ,CATTE F ,COLL T *et al.* A geometric model for active contours [J]. *Numerische Mathematik* ,1993 ,66( 1) : 1-31.
- [14] MALLADI R ,SETHIAN J A ,VEMURI B C. Evolutionary fronts for topology independent shape modeling and recovery [C] //Proc of the 3rd European Conference on Computer Vision. 1994: 3-13.
- [15] MALLADI 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.
- [16] KIMMEL R ,BRUCKSTEIN A M. Tracking level sets by level sets: a method for solving the shape from shading problem [J]. *Computer Vision and Image Understanding* ,1995 ,62( 2) : 47-58.
- [17] SAPIRO G ,TANNENBAUM A. Area and length preserving geometric invariant scale-spaces [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence* ,1995 ,17( 1) : 67-72.
- [18] CHAN T ,VESE L. Active contours without edges [J]. *IEEE Trans on Image Processing* ,2001 ,10( 2) : 266-277.
- [19] MUMFORD D ,SHAH J. Optimal approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics* ,1989 ,42( 5) : 577-685.
- [20] 杨名宇 ,丁欢 ,赵博 ,等. 结合邻域信息的 Chan-Vese 模型图像分割 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报* ,2011 ,23( 3) : 413-417.
- [21] 熊思. C-V 模型在乳腺 X 影像分割中的研究和应用 [J]. *湖北第二师范学院学报* ,2011 ,28( 2) : 47-51.
- [22] CASELLES V ,CARTE F ,COLL T *et al.* A geometric model for active contours in image processing [J]. *Numerische Mathematik* ,1993 ,66( 1) : 1-31.
- [23] CASELLES V ,KIMMEL R ,SAPIRO G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision* ,1997 ,22( 1) : 61-79.
- [24] PENG D ,MERRIMAN B ,OSHER S *et al.* A PDE-based fast local level set method [J]. *Computational Physics* ,1999 ,155( 2) : 410-438.
- [25] LI Chun-ming ,XU Chen-yang ,GUI Chang-feng *et al.* Level set evolution without reinitialization: a new variational formulation [C] //Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005: 430-436.
- [26] LI Chun-ming ,XU Chen-yang ,GUI Chang-feng *et al.* Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation [J]. *IEEE Trans on Image Processing* ,2010 ,19( 12) : 3243-3254.
- [27] PRICEA J R ,AYKACA D ,WALLB J. Improvements in level set segmentation of 3D small animal imagery [C] //Proc of SPIE. 2007: 1-10.
- [28] XIE Qiang-jun ,CHEN Xu-feng ,MA Li *et al.* Segmentation for CT image based on improved level set approach [C] //Proc of the 1st International Congress on Image and Signal Processing. 2008: 725-728.
- [29] OLIVIER B ,DENIS F ,PHILIPPE T *et al.* Variational B-spline level-set: a linear filtering approach for fast deformable model evolution [J]. *IEEE Trans on Image Processing* ,2009 ,18( 6) : 1179-1191.
- [30] CREMERS D ,TISCHHAUSER F ,WEICKERT J *et al.* Diffusion snakes: introducing statistical shape knowledge into the Mumford-Shah functional [J]. *International Journal of Computer Vision* ,2002 ,50( 3) : 295-313.
- [31] DEBREUVE E ,GASTAUD M ,BARLAUD M *et al.* Using the shape gradient for active contour segmentation: from the continuous to the discrete formulation [J]. *Mathematical Imaging and Vision* ,2007 ,28( 1) : 47-66.
- [32] MORSE B ,LIU W ,YOO T S *et al.* Active contours using a constraint based implicit representation [C] //Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005: 285-292.
- [33] GELAS A ,BERNARD O ,FRIBOULET D *et al.* Compactly supported radial basis functions based collocation method for level set evolution in image segmentation [J]. *IEEE Trans on Image Process* ,2007 ,16( 7) : 1873-1887.
- [34] 刘建磊 ,冯大政. 一种基于二维拉格朗日连续水平集的图像分割方法 [J]. *电子与信息学报* ,2010 ,32( 7) : 1712-1716.
- [35] 王琪 ,丁辉 ,张伟 ,等. 利用分区处理和水平集算法分割序列三维乳腺 MRI [J]. *清华大学学报* ,2009 ,49( 3) : 421-426.
- ( 上接第 1206 页)
- [74] LI Fa-chao ,XU Li-da ,JIN Chen-xia *et al.* Structure of multi-stage composite genetic algorithm( MSC-GA) and its performance [J]. *Expert Systems with Applications* ,2011 ,38( 7) : 8929-8937.
- [75] 潘晓英 ,刘芳 ,焦李成. 基于智能体的多目标社会进化算法 [J]. *软件学报* ,2009 ,20( 7) : 1703-1713.
- [76] 陈皓 ,崔杜武 ,崔颖安 ,等. 族群进化算法 [J]. *软件学报* ,2010 ,21( 5) : 978-990.
- [77] 慕彩红 ,焦李成 ,刘逸. 求解约束优化问题 M-精英协同进化算法 [J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版* ,2010 ,37( 5) : 852-861.
- [78] 严太山 ,崔杜武. 求解无约束优化问题的知识进化算法及其收敛性分析 [J]. *控制理论与应用* ,2010 ,27( 10) : 1376-1382.
- [79] 葛继科 ,邱玉辉 ,吴春明 ,等. 遗传算法研究综述 [J]. *计算机应用研究* ,2008 ,25( 10) : 2911-2916.
- [80] RASOUL I ,REZA N. Evolving neural network using real coded genetic algorithm for permeability estimation of the reservoir [J]. *Expert Systems with Applications* ,2011 ,38( 8) : 9862-9866.
- [81] 李敬花. 遗传蚁群融合算法求解多项目资源能力平衡问题 [J]. *计算机集成制造系统* ,2010 ,16( 3) : 643-649.
- [82] CABELLO J M ,CEJUDO J M ,LUQUE M *et al.* Optimization of the size of a solar thermal electricity plant by means of genetic algorithms [J]. *Renewable Energy* ,2011 ,36( 11) : 3146-3153.
- [83] 潘晓英 ,焦李成. 社会协作的多智能体进化 [J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版* ,2009 ,36( 2) : 274-280.
- [84] 张英杰 ,刘朝华. 融合微粒群的多种群协同进化免疫算法 [J]. *控制与决策* ,2010 ,25( 11) : 1657-1662.