

文章编号: 1001-0920(2002)02-0219-04

组合优化问题中遗传算法的局限性及其改进模式

韩生廉, 武晓今, 倪 萌

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

摘 要: 遗传算法在解决多峰函数求解、多目标规划和生产调度等问题时, 相比其它优化算法具有一定的优势, 但仍存在严重的局限性, 尤其表现在组合优化的求解问题中。为此, 提出一种“生物进化过程=遗传操作+免疫功能”的新模式, 并通过生产调度的求解问题验证了该算法的有效性。

关键词: 编码-交叉-变异; 致死遗传子; 免疫功能; 自我调节

中图分类号: TP 301

文献标识码: A

Limitation and improved model of GA in combinatorial optimization

HAN Sheng-lian, WU Xiaojin, NI Meng

(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Genetic Algorithm, which is based on biological evolution, though shows more efficiency than other optimization methods in multi-peaks, multi-target planning and production schedule problems, but still has severe limitation, especially in combined optimization problems. A kind of GA with immune function is proposed, which can ensure the diversity of population and solve the control of convergence direction. Its efficiency is shown by a production schedule example.

Key words: code-crossover-mutation; infeasible gene; immune function; self-adjustment

1 引 言

遗传算法是一种基于生物进化机制的随机搜索算法, 其典型应用是规划问题, 尤其是组合优化问题。这类问题在理论上可通过对离散变量的有限运算步骤求得最优解, 但是随着问题规模的扩大, 计算步骤会多得难以想象。若离散变量数为 n , 组合最优化问题便成为 e^n 个数量级; 当 n 很大时, 组合最优化问题便成为实际上无法求严密解的 NP 完全问题。对于求解生产调度等规模较大的组合优化问题, 虽

然有各种不同的方法, 但无论从实用性还是求解效率上讲, 遗传算法都具有相当的优越性。但也必须注意到遗传算法本身构造所带来的局限性, 这种局限性在组合优化问题的求解过程中表现得尤为突出。

2 遗传算法局限性的根本原因

遗传算法在组合优化及多峰函数求解问题中出现的“早期收敛”和“遗传漂移”等现象, 已引起人们的关注。为了保持遗传操作过程中种群的多样性,

收稿日期: 2000-11-13; 修回日期: 2001-06-27

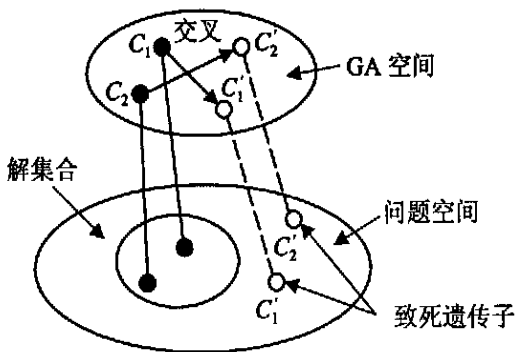
基金项目: 国家自然科学基金项目 (79970030, 60104004); 上海市高等学校科学技术发展基金项目 (99JG05038)

作者简介: 韩生廉 (1943—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事模糊控制与模糊决策、模糊控制与遗传算法结合技术等研究; 武晓今 (1974—), 男, 上海南江人, 硕士生, 从事模糊控制与模糊决策、模糊控制与遗传算法等研究。

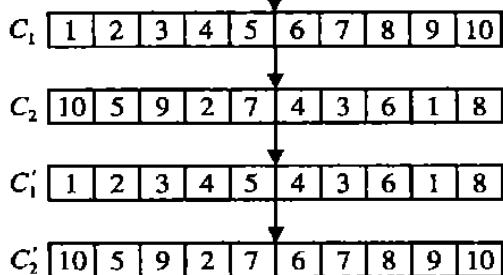
人们提出了多种方案以改进遗传算法的搜索能力和效率^[1-7]。但是我们发现,遗传算法的操作效率和应用范围受到局限的根本原因是它的构造模式问题,即问题空间与遗传操作空间的相互映射问题。具体如下:

- 1) 如何使问题空间的解集中所有解都能用遗传算法空间(GA 空间)的染色体来描述;
- 2) 如何使 GA 空间的染色体能与问题空间解集中所有解一一对应。
- 3) 如何使前一代的性质能有效地遗传到下一代;
- 4) 如何控制遗传算法的收敛方向;
- 5) 如何使遗传算法具有记忆功能,减少重复性操作,避免近亲繁殖。

前3个问题的解取决于编码-交叉-变异操作,由于通常变异概率取得很小,编码和交叉操作便显得尤为重要。编码-交叉操作若不恰当,GA 的应用范围将受到限制,严重时会使 GA 空间生成的染色体成为问题空间中毫无意义的致死个体(见图 1)。图 1 示出了 10 个城市的 TSP 问题(每个城市只能访问一次),以访问城市的顺序编码,采用一点交叉,交叉位置用竖线表示。



(a) 两空间操作中生成的致死遗传子
交叉位置



(b) 10 个城市旅行商问题产生的致死遗传子
图 1 GA 空间生成的致死个体

由图 1 可见,前一代的性质未能有效地遗传到下一代。显然,遗传子 C_1, C_2 与问题空间解相对应,然而交叉后生成的下一代 C_1' 和 C_2' 却丢失了前一代的重要性质,成为问题空间解集合之外的致死个体(违反了每个城市只能历访一次的约束条件)。

从仿生学的角度看,Holland 提出的 GA 只是模拟了保证遗传操作的优胜劣汰,并没有充分完整地反映生物进化过程,它的构造必然使其性能和应用范围受到严重限制,在 Holland 的 GA 框架内,无论怎样改良都难以收到理想的效果。因此,只有摆脱传统 GA 框架的束缚,构造出能充分完整地反映生物进化过程的 GA,才能从根本上解决上述问题。为此我们提出如下模式:

$$\text{生物进化过程} = \text{遗传操作} + \text{免疫功能} \quad (1)$$

免疫功能的重要特性之一是免疫记忆,当适量的抗原入侵时,免疫系统将生成抗体巧妙地与抗原对应;当同种抗原再次入侵时,不论其数量多少,免疫系统都会迅速响应。免疫功能的另一特性是能对抗体产生促进与抑制功能,我们利用该功能有效地控制了优秀抗体的浓度,保证了抗体的多样性,从而有效地避免了由于近亲繁殖所导致的早期收敛。

3 免疫遗传算法(IGA)的构造

将生物体的免疫功能引入遗传算法时,应注意以下几点:

- 1) 如何使问题空间的目的函数和约束条件与抗原相对应;
- 2) 如何有效地利用机体免疫系统的记忆功能;
- 3) 如何使抗体具有多样性,只有保持抗体的多样性才能辨识多种侵入抗原,并可利用该性质扩大遗传算法的应用范围。

遵循上述 3 点,我们设计的免疫遗传算法如图 2 所示。图中虚线部分是为了提高搜索前期效率而考虑的方法,即通过反复实验后得到亲和力优良抗体,并将其保存在记忆库中,使其参与初期抗体群的生成。

3.1 亲和力与相似度

本算法定义了抗体之间的亲和力 s 和抗体与抗原之间的相似度 f ,用海明距离计算抗体与抗体间的亲和力。另外,在计算过程中将亲和力好的抗体记录到记忆装置,从而形成一个优良抗体库。

设 $f_{u,v}$ 表示抗体 u 与抗体 v 之间的相似度, s 表示抗体 u 与抗原的亲和力。二者分别计算如下

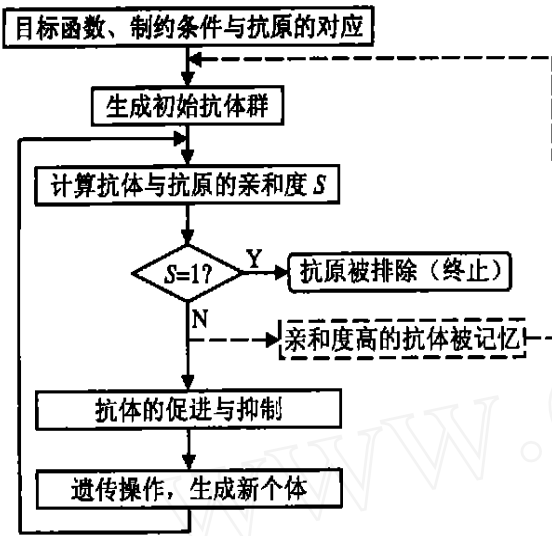


图 2 免疫遗传法的构造

$$f_{u,v} = \frac{1}{1 + H(u,v)} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{1 + OP_u} \quad (3)$$

其中, $H(u, v)$ 为抗体 u 与抗体 v 的海明距离, 当 $H(u, v) = 0$ 时 $f_{u,v} = 1$, 表示抗体 u 与抗体 v 一致; OP_u 为欲解决问题的目的函数或制约条件, 当 $S = 1$ 时表示抗体和抗原完全结合, 能排除抗原, 求得了最优解。

3.2 近亲繁殖的控制

如何控制搜索后期优良个体的近亲繁殖是避免早期收敛的根本途径。为此, 下一代抗体的期待值必须与该抗体的浓度相关联。假设留存到下一代抗体 u 的期望值为 e_u , 抗体 u 的浓度为 c_u , 则有

$$e_u = \frac{S}{C_u} = \frac{1}{C_u(1 + OP_u)} \quad (4)$$

$$C_u = \frac{\text{与 } u \text{ 具有相同亲和度的抗体数}}{N} \quad (5)$$

其中 N 表示群体的规模。

本文根据 e_u 的大小来确定是否留存抗体 u 。式 (4) 表明抗体存续的期待值与亲和力成正比而与其浓度成反比, 这便有效地避免了未成熟收敛。为避免

优秀抗体的丢失, 本文在后代保存了 5% 的亲密度最高的优秀抗体。

4 供配水调度应用实例及模拟结果

供配水系统如图 3 所示, 该系统通过一组电机向蓄水池送水, 再由配水电机从蓄水池中抽水供给用户。随着地球资源的不断开采, 可利用的天然资源不断减少, 因此, 最大限度地节省能源、提高效率对于可持续发展非常重要。本例通过引入免疫遗传算法实现向蓄水池供水的方案, 达到电机起停次数最少, 从而节省能源的目的。

供配水系统是一个典型的生产调度问题。随着现代工业的发展, 小批量、多类型、具有不同完工时间和产品要求的工艺流程已逐渐取代大批量单一类型的工艺流程。在这种情况下, 如何利用现有资源, 满足任务所需的各种约束(能源、加工次序、所需机器), 使所有的任务都能尽量按时完成(性能指标最小), 便成为一个十分现实和迫切的问题。另外, 实际中的生产调度是一个动态的不断演化过程。本例中为了最大限度地节省电能, 应使送水电机的起停次数最少。本文从供配水系统的要求出发, 得到以下函数关系式: 在图 3 所示的供配水系统中, 目的是取得

$$\min \left(\sum_{i,k} W_{y_i(k)} \times Y_i(k) \right) \quad (6)$$

其中, $W_{y_i(k)}$ 为 k 时刻第 i 台电机的比例系数; $Y_i(k) = |S_i(k) - S_i(k-1)|$ 为第 i 台电机在 k 时刻的起停变化, $S_i(k)$ 为第 i 台电机在 k 时刻的状态, $Y_i(k), S_i(k) \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n_o$ 。约束条件为

$$\begin{aligned} & (Q_i S_i(k) - Q_d(k) - \\ & S(h_1(k) - h_1(k-1)) = 0 \\ & h_2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, h_1 和 h_2 分别为配水池上下水位限制(m), S 为配水池截面积(m^2), $h(k)$ 和 $h(k-1)$ 为配水池在 k 和 $k-1$ 时刻的水位(m), Q_d 为 k 时刻用户的需水量(m^3/h), Q_i 为第 i 台送水电机的额定送水量(m^3/h)。

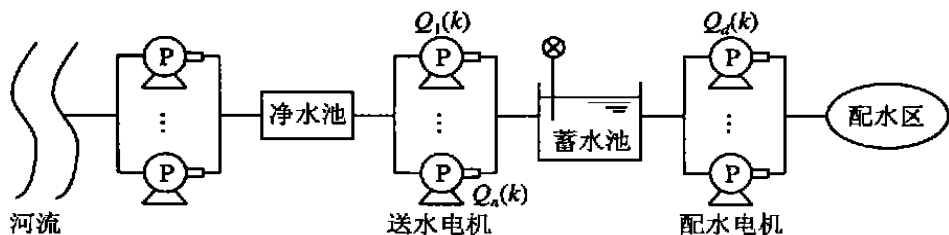


图 3 供配水系统示意

评价函数为

$$f = a_w A + b_v B + c_w C \quad (8)$$

其中, $A = \sum_i$ (水泵在一天内的切换次数), B 为违反约束条件(7) 的次数, C 为配水池离开额定水位的次数, a_w, b_v 和 c_w 为权重系数。

对该问题采用免疫遗传算法, 以 5 台电机在 0 ~ 23 h 的二进制位串作为抗体个体, 初始抗体群按位随机产生。定义抗体与抗原之间的亲和度为 $1/(1 + F(f))$, 式中 $F(*)$ 表示对评价函数在 $[0, 1]$ 区间量化后的结果。抗体群通过浓度控制删除的个体, 可通过普通遗传算法生成新抗体来补充。

计算后的 IGA 和 GA 在不同代数上的比较结果如表 1 所示, 其中评价价值已按最大值量化到 $[0, 1]$ 区间。

表 1 IGA 与通常 GA 的比较

实验序号	IGA (无记忆库)		GA	
	最高亲和度评价价值	STEP 数	最高亲和度评价价值	STEP 数
1	0.756	127	0.373	176
2	0.786	131	0.759	159
3	0.814	76	0.773	94
4	0.911	231	0.781	244
5	0.826	78	0.790	212

5 结 语

本文在遗传算法中引入了生物体的免疫功能,

将遗传空间与问题空间融为一体, 使遗传操作的收敛方向得到了有效控制。此外, 记忆功能和自我调节机制的加入, 保证了群体的多样性。免疫遗传算法在生产调度问题中显示出良好的性能, 可以预期该算法将在自动控制规划、生产调度等领域发挥重要作用。

参考文献 (References):

[1] Goldberg D E, Richardson J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization [A]. Proc of the 2nd ICGA [C]. Lawrence Erlbaum, 1987. 41-49.

[2] Mahfoud S W. Genetic drift in sharing methods [A]. Proc 1st IEEE Conf Evolutionary Computation [C]. Piscataway: IEEE Press, 1994. 67-72.

[3] 黄昱坤, 韩生廉, 胡国四. 遗传算法非效率操作的改进方法 [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 15(2): 251-253.

[4] 唐加福, 汪定伟, 许宝栋, 等. 基于评价函数的遗传算法求解非线性规划问题 [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 15(5): 573-576.

[5] 胡国四, 韩生廉. 遗传算法适值函数定义方法研究 [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 1999, 14(6): 694-697.

[6] 何琳, 王科俊, 李国斌, 等. 最优保留遗传算法及其收敛性分析 [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 15(1): 63-66.

[7] 韩生廉, 倪萌, 葛万成. 遗传算法所面临的课题及免疫功能引入的必要性 [A]. Proc of the 3rd World Congress on Intell Contr & Autom [C]. Hefei, 2000. 542-544.

下 期 要 目

鲁棒辨识研究的现状	莫建林 等
神经模糊系统中模糊规则的优选	贾立 等
一种时序数据的离群数据挖掘新算法	郑斌祥 等
一种模糊神经网络控制器参数的混沌优化设计	李祥飞 等
基于泰勒级数拟合的机器人模糊连续变增益 H 控制	虞忠伟 等
非完整移动机器人的轨迹跟踪控制	李世华 等
一种求解整数规划与混合整数规划非线性罚函数方法	孟志青 等
用 GA 求解动态联盟中伙伴选择的多目标优化模型	曹洪医 等
不需要持续激励条件的非线性离散时间系统的自适应模糊逻辑控制	刘晓华 等
基于混合逻辑动态模型的混杂系统预测控制	李秀改 等
复杂系统的质量生存可达性决策	叶明确 等