

基于生命期引导的生态进化模型*

曹先彬 许凯 章洁 王煦法

(中国科学技术大学计算机科学技术系 合肥 230026)

E-mail: xbcav@ustc.edu.cn

摘要 进化算法的一个很大的不足是个体进化本身没有一个明确的引导趋势. 该文借整个体进化的生命周期性, 提出了一种基于生命期引导的生态进化模型. 基于此模型的算法在个体生命期的各个阶段设置了相应的引导算子, 使个体在整个生命期都基于其生态特征而被引导进化. 实验结果验证了其优越性.

关键词 进化算法, 生态环境, 生命期, 引导.

中图法分类号 TP18

进化算法的一个很大的不足是算法的进化仅仅采用遗传操作算了, 作为操作对象的个体是基于适应度被选择出来的, 遗传操作存在很大随机性, 而进化本身没有一个明确的引导趋势^[1]. 这必然导致在求解具体问题时代化速度很慢, 易出现未成熟收敛和遗传漂移现象. 若能对个体的进化施加一个明确的引导因素, 将大大提高算法的收敛性能. 但这种引导绝不能是主观的, 而应依赖于个体进化的环境和特点.

在引导进化的研究方面, 传统进化算法仅采用基于适应度选择的定向性操作算了, 使个体逐渐向某一极值点进化, 没有考虑进化的引导^[1]. 现有的改进算法虽然很多, 如参数调整法^[2]、引入了群^[3]等, 但它们的出发点是如何维持个体的多样性以及使未成熟收敛局部化, 没有明确考虑进化的引导. 日前, 施以进化明确引导的典型工作有 TABU(TABUlate)与进化算法的结合^[1]、Culture 算法^[4]以及 Sebag 用机器学习来控制进化^[5]等, 这些工作都是从传统人工智能角度来引导进化的, 没有充分考虑个体进化的复杂性.

对个体进化认识程度较高的是生态科学. 生态学认为, 生命期模式在个体的成长过程中占据十分重要的地位^[6]: 生态环境中的生物个体在进化时, 即使在它自己的局部环境, 也是有生命周期的, 个体在不同的局部环境和生命期的各个不同阶段具有不同的成长特性, 并在生命期模式的控制引导下体现出其实际成长的特点. 但在另一方面, 至今还很少有工作关注于此. 传统进化算法和目前的改进算法虽然也声称模拟了生物在环境中的进化模式, 但它对个体进化的生命期模式考虑得极为简单, 一般认为个体只生存一代, 并且每代个体的进化模式相同.

本文提出了一种基于生命期引导的生态进化模型. 基于此模型的算法使个体在其生命期的各个阶段具有各自的局部环境, 设置了相应的成长特性, 使个体在整个生命期都基于其生态特征而被引导进化. 实验结果表明, 其进化效能大大优于一般进化算法.

本文第 1 节分析并引入生物个体基于生命期的进化模式, 第 2 节给出基于生命期引导的生态进化模型. 第 3 节是模拟实验.

1 基于生命期的个体进化模式

作为一种优化方法, 传统进化算法只模拟了生物进化的一个侧面. 我们可以从生态科学中得到启示. 生态学

* 本文研究得到国家自然科学基金(No. 69971022)和中国科学技术大学青年科技基金资助. 作者曹先彬, 1969年生, 博士, 副教授, 主要研究领域为进化计算, 智能信息处理. 许凯, 1977年生, 硕士生, 主要研究领域为计算智能. 章洁, 女, 1975年生, 硕士生, 主要研究领域为计算智能. 王煦法, 1948年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算智能, 人工生命.

本文通讯联系人: 曹先彬, 合肥 230026, 中国科学技术大学计算机科学技术系

本文 1999-03-09 收到原稿, 1999-06-11 收到修改稿

认为,生物个体在生态系统中的生长环境和特征非常复杂,其中生命期模式是生物进化的主要特征之一^[6];生物个体在生态环境中的生长是分阶段进行的,每一个阶段的成长特性并不相同.具体而言,生物个体的生长历程一般被分为3个主要阶段:幼年期、成熟期和衰老期.生命期模式认为,个体在各个阶段的生长环境也即个体所处的阶段,其成长特性主要由其生命力和相互作用力来体现:

(1) 幼年期:由于个体尚未成熟,个体的生命力很强,能够根据环境不断地调节自己,个体之间的相互作用力较弱;

(2) 成熟期:个体已经成熟,相对于幼年期来讲,个体的生命力变弱,因而根据环境调节和改变自己的能力变弱,但个体与个体之间的相互作用力变强;

(3) 衰老期:个体逐渐趋于衰老,因此个体的生命力更弱,基本上已经不能根据环境来调节和改变自己,而且个体与个体之间的相互作用力也变弱.

基于以上分析,我们提出,用图1的分阶段曲线来表示个体在整个生命期内的不同特征.

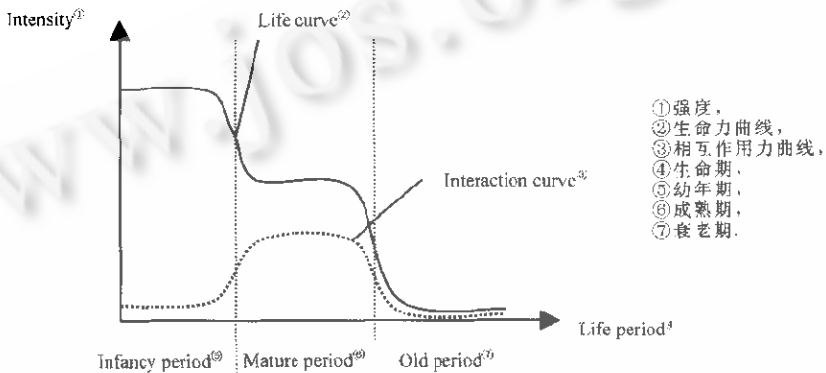


Fig. 1 Grading curve diagram
图1 分阶段曲线图

2 基于生命期引导的生态进化模型

根据生物个体的生命期进化模式,我们提出了一种基于生命期引导的生态进化模型.如图2所示,其中个体的生命力由选择、交叉、变异等遗传操作的概率表示,个体之间的相互作用力体现为个体间的相互促进与抑制(internal act and compete,简称IAC)关系.

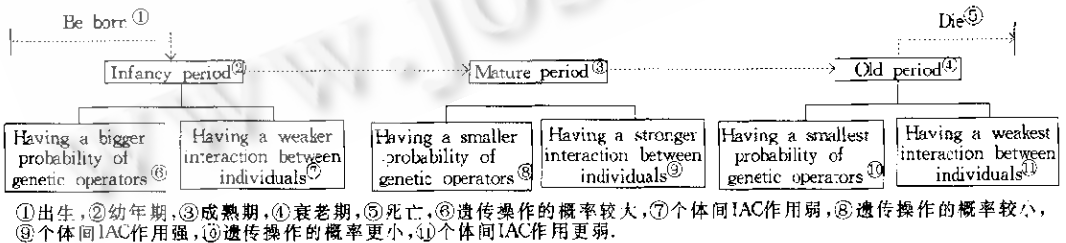


Fig. 2 Ecological evolution model guided by life period
图2 基于生命期引导的生态进化模型

在基于生命期引导的生态进化模型中,个体群在初始随机生成(即出生)后,就进入第1个局部生长环境——幼年期,并按其相应的成长特性生长.结束幼年期后进入成熟期,成熟期结束后进入衰老期.在每一阶段,个体都按其相应的成长特性生长.最后,当个体退出衰老期时死亡.在此进化模型中,个体在每一阶段的成长特性主要涉及两个因素:个体的生命力和个体间的相互作用力强度.

2.1 个体生命力强度的设定

我们利用选择、交叉、变异等遗传操作算子所取概率值的大小来表示个体的生命力强弱,并规定处于同一阶段的所有个体的生命力一致;如果个体的遗传操作概率较大,我们认为该个体的生命力较强,否则该个体的生命力较弱.本模型用如下的数学公式来表示个体在生命期的3个阶段中遗传操作的概率值 $p(t)$:

$$p(t) = \begin{cases} p_2 + \frac{p_1 - p_2}{1 + e^{(t-a_1)/T}}, & 0 < t \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ p_3 + \frac{p_2 - p_3}{1 + e^{(a_2 - t)/T}}, & t > \frac{a_1 + a_2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中,参数 T 用来调节从幼年期到成熟期、从成熟期到衰老期两个阶段概率值突变的程度. T 的取值越小,概率值突变的程度越大,否则概率值突变的程度越小.其余参数 p_1, p_2, p_3, a_1, a_2 的含义如图3所示.并且需保证函数 $p(t)$ 在定义域内连续.

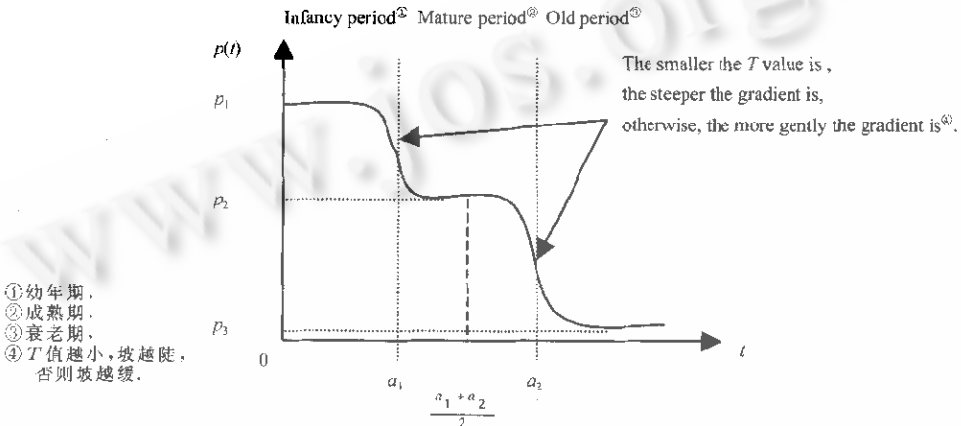


Fig. 3 The probability curve of evolutionary operators in three steps
图3 3个阶段进化算子的概率值曲线

对照图2和图3可以看出,本模型设定的数学方程 $p(t)$ 正能体现个体在3个阶段中生命力的不同.

2.2 个体间相互作用力强度的设定

生物个体生存于一定的生态环境中,与其他个体之间彼此产生相互作用.这种作用既可能是相互促进的,使各自的表现型都得到提升,也可能是相互抑制的,一方压制另一方的成长.

首先,为描述个体间的相互作用,在上述进化模型中,我们将个体表现型看作是个体的动作值,并借鉴 IAC 神经网络中的 Grossberg 公式来表示个体之间的相互作用. Grossberg 公式正是用来描述神经元间的相互促进和抑制联系^[7]. 本文用下式表示个体间的相互作用:

$$\Delta b_k = (\max - b_k) e_k - (b_k - \min) i_k - \text{decay}(b_k - \text{rest}). \quad (2)$$

其中 b_k 为个体 k 的动作值,可直接对适应度; Δb_k 表示个体 k 动作值的变化; \max 和 \min 分别表示个体的最大、最小动作值; e_k 为其他个体对本体的促进力,它使该个体的动作值朝着最大值的方向增加; i_k 为其他个体对本体的抑制力,它使该个体的动作值朝着最小值的方向减少.个体 k 受到的促进力为

$$e_k = \sum_j b_j,$$

其中 $b_j \geq (\max + \min)/2, j \neq k$.

个体 k 受到的抑制力为

$$i_k = \sum_j b_j,$$

其中 $b_j < (\max + \min)/2, j \neq k$.

另外, rest 表示个体在无外界联系时的基本动作值,称为静息值; decay 表示衰减率,它决定了个体动作值趋

于静息水平的强弱, $\min \leq rest; 0 \leq decay \leq 1$.

可以看出,在公式(2)中,一个个体对另一个体的作用是不确定的,当个体的动作值低时,它可能起促进作用,反之,则可能起抑制作用,其动力学系统体现出相互促进与抑制的特性,这正符合个体之间的相互作用联系.

其次,为体现不同阶段内个体间相互作用力的不同,我们引入两个函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$,使个体动作值的表示大体上满足个体群在生命期中相互作用的规律.本模型用以下公式表示个体 k 在 $t+1$ 时刻的动作值:

$$b_k(t+1) = \begin{cases} b_k(t) + \Delta b_k(t) \cdot f_1(t), & 0 < t \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ b_k(t) + \Delta b_k(t) \cdot f_2(t), & t > \frac{a_1 + a_2}{2} \end{cases} \quad (3)$$

函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别为

$$f_1(t) = \frac{1}{1 + e^{-(t-a_1)/T}}, \quad (4)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{1 + e^{(t-a_2)/T}}, \quad (5)$$

其中,参数 a_1, a_2, T 的定义与公式(1)的定义相同.函数 $f_1(t)$ 是一个类 Sigmoid 函数,体现了个体从幼年期到成熟期之间的相互作用力规律;函数 $f_2(t)$ 是一个沿 Y 轴对称的类 Sigmoid 函数,体现了个体从成熟期到衰老期之间的相互作用力规律.

需要强调的是,本文提出的基于生命期引导的生态进化模型并不排斥其他一些对传统进化算法的改进.若将本进化模型和其他一些改进算法结合,应当可以获得更好的效果.这时,改进策略应当用于本模型的某一或几个阶段内.这一点可以从以下模拟实验中得到验证.

3 模拟实验

我们以一种具有实际意义的函数优化问题为例来验证本文所提出的进化模型的收敛性能.待优化的函数如下所示:

$$flow = f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} d_{il} x_{ij} x_{kl}, \quad (6)$$

以下两个约束条件必须满足.

约束 1:
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

约束 2:
$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

此函数实质上是 一种工具布局的抽象,它在理论和实际应用中都有重要的应用价值.多年来,人们一直在寻求得到一种有效解法.目前所用的求解算法很多,如 CRAFT(computerized relative allocation of facilities technique)启发式算法^[8]、神经网络算法^[9]、进化算法^[10]等,但它们在求解时都有各自的不足.启发式算法的求解速度慢,结果依赖于初始解;神经网络方法的训练时间较长,且易陷入局部最优;传统的进化算法在个体多样性差时也易出现未成熟收敛的问题,陷入局部最优.

我们用本文提出的基于生命期引导的生态进化模型来优化此函数,同时也将此模型和引入子群的策略结合起来求解.为了与其他算法进行比较,我们采用与文献[8]相同的流矩阵和距离矩阵作为 flow 函数的 F 矩阵和 D 矩阵, $F = (f_{ik})_{n \times n}, D = (d_{il})_{n \times n}, n = 30$.另外,

$$X = (x_{ij})_{n \times n}, \quad x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当工具 } i \text{ 位于位置 } j \text{ 时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

表 1 给出了用本文模型和其他几种方法得到的优化结果,图 4 是基于这几种方法的求解过程.代数规定为 320,本文所提出的进化模型也就规定个体的生命期界限为 320.从表 1 和图 4 可以看出,用本文模型得到了一个相对较好的解,flow = 3114,进化代数为 149,算法的收敛速度也大大优于其他几种求解方法.

Table 1 The results' comparison among these methods
表 1 各种方法结果比较

Method ^①	Original solution ^②	Original cost ^③	Final result ^④
CRAFT	1	4 030	3 161
	2	3 879	3 169
	3	4 086	3 197
	4	3 824	3 273
	5	4 112	3 148
Method in Ref. [9] ^⑤			3 138
Method in Ref. [10]			3 144
Method in this paper ^⑥			3 114

①方法,②初始解,③初始代价,④最后结果,⑤文献[9]的方法,⑥基于本文模型的改进算法。

在表 1 中,CRAFT 启发式算法需要初始解,实验中随机生成的 5 种初始解为:

- <1> 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29
- <2> 14,24,3,7,21,20,10,25,9,12,15,11,13,28,19,23,17,2,22,16,0,27,26,5,8,18,29,6,4,1
- <3> 27,4,0,7,2,10,23,6,21,11,19,17,13,28,15,12,18,25,26,20,3,14,24,1,8,9,5,29,22,16
- <4> 10,27,24,0,14,25,8,20,3,22,7,21,4,28,18,16,9,2,26,13,19,29,11,17,1,5,12,15,6,23
- <5> 12,19,21,23,18,16,17,15,22,20,9,13,7,11,6,26,24,8,3,29,27,25,4,10,1,0,5,14,28,2

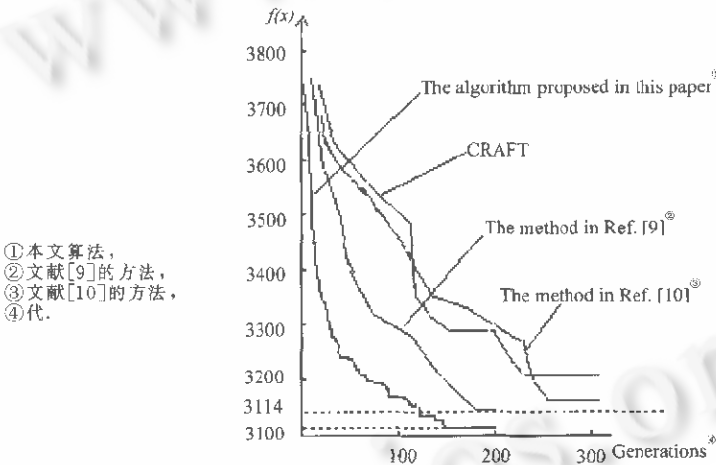


Fig. 4 The solutions of these methods

图4 几种方法的求解过程

进一步地,我们也将基于生命期引导的生态进化模型和引入子群的改进遗传算法相结合,在 3 个生命期阶段中都采用引入子群的遗传算法,得到了一个更好的结果 3079,这时的进化代数较多。

4 结束语

本文借鉴生态科学对个体进化过程和特点的认识,对进化算法无明显引导因素的缺点进行了改进,提出了一种基于生命期引导的生态进化模型。此模型将个体的进化按生命期分为 3 个阶段,个体在每一阶段的成长特性不同,使个体在整个生命期都基于其局部环境和成长特性被引导进化。本文同时把这种模型运用于函数优化问题,实验结果表明,引入生物个体的生命周期性作为进化过程的引导趋势,求解问题的结果更优,并且求解速度大大加快。

参考文献

1 Chen Guo-liang, Wang Xu-fa, Zhuang Zhen-quan *et al.* Genetic Algorithm and Its Applications. Beijing: People's Post

and Tele-Communications Press, 1996

(陈国良, 王煦法, 庄镇泉等. 遗传算法及应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996)

- 2 Srinivas M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656~667
- 3 Jones T. Crossover, macromutation and population-based search. In: Eshelman L ed. *Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1995. 73~80
- 4 Cavaretta M J. Using a culture algorithm to control genetic operators. In: Fogel D D ed. *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming*. Cambridge, MA: MIT Press, 1994. 158~166
- 5 Sebag M, Ravise C, Schoenauer M. Controlling evolution by means of machine learning. *Evolutionary Programming V*, 1996. 57~66
- 6 Huberman B A. *The Ecology of Computation*. The Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., 1988
- 7 Rumelhart D B, Medlland J. *Exploration in Parallel Distributed Processing*. Cambridge, MA: MIT Press, 1988
- 8 Heragu S S. Facility layout. *EJORDT*, 1992, 57(2): 135~304
- 9 Heragu S S. Experimental analysis of simulated annealing based algorithms for the layout problem. *EJORDT*, 1992, 57(2): 190~202
- 10 Nissen V. Solving the quadratic assignment problem with clues from nature. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, 5(1): 66~72

Ecological Evolution Model Guided by Life Period

CAO Xian-bin XU Kai ZHANG Jie WANG Xu-fa

(*Department of Computer Science and Technology University of Science and Technology of China Hefei 230026*)

Abstract Having no distinctly guided tendency is one of the main weaknesses of Evolutionary Algorithms. In reference to the individuals' life periodicity, an ecological evolution model guided by life period is proposed in this paper. In the model, the guiding sectors are set up at each phase of the life period, and the individuals' evolution is guided by their ecological features within the whole life period. The experimental results show the model's effectiveness.

Key words Evolutionary algorithm, ecological environment, life period, guide.