

文章编号: 0253-987X(2001)01-0066-05

一种快速收敛的遗传算法及其应用

闫洁, 曹秉刚, 史维祥

(西安交通大学机械工程学院, 710049 西安)

摘要: 为了解决遗传算法的收敛速度和全局收敛性之间的矛盾, 提出了一种快速收敛的遗传算法, 即“适应度缩放”加“有偏外来移民”的遗传算法. 将该方法应用于柔性结构振动主动控制中的作动器/传感器位置及反馈增益的优化, 其优化效果明显优于传统的优化算法. 数字仿真结果表明, 对于复杂非线性约束优化问题, 该遗传算法具有较好的快速收敛性和全局收敛性, 由优化了位置的作动器/传感器和优化增益构成的控制系统具有良好的减振效果.

关键词: 遗传算法; 快速收敛; 主动控制

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Fast Converging Genetic Algorithm and Its Application

Yan Jie, Cao Binggang, Shi Weixiang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the main conflict of the convergence speed with the global astringency, a fast converging genetic algorithm (GA) is proposed. This improved GA is applied to optimize the sensor/actuator placement and feedback gain in active control of flexible structure. The simulating results indicate that the improved GA has the characters of high convergent efficiency and good quality of solutions for complicated nonlinear constrained optimization problem, and that the closed loop active control system can effectively suppress vibration.

Keywords: genetic algorithm; fast convergence; active control

遗传算法是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰生物进化过程的计算模型, 是一种自适应启发式的全局意义上的搜索方法^[1]. 遗传算法具有很强的鲁棒性和通用优化能力. 优化计算时, 只需适应度值, 不需要导数信息, 也不需要设计空间或函数的连续性条件, 只要遗传进化中每一代都包含上一代的最优个体, 搜索就会收敛到全局最优解^[2]. 其搜索具有隐并行性, 表面上每一代只处理 n 个个体, 实质上却处理了 Cn^3 个能存活的模式^[1], 所以它的搜索

速度很快. 遗传算法在组合优化、自适应控制规划设计、模式识别、图像处理、机器学习和人工生命等领域的应用中已展示了其特色和魅力^[3].

目前, 遗传算法本身在理论和应用方法上仍有许多亟待完善之处, 一个突出问题是收敛速度和全局收敛性之间的矛盾. 研究发现^[4], 遗传算法可以用极快的速度达到最优解的 90% 左右, 但要达到真正的最优解则要花费很长的时间, 即它的局部搜索能力不足. 解决这个问题一般从两方面入手: 一方面

进一步改进现有遗传算法; 另一方面将遗传算法和神经网络、模拟退火等算法相结合, 以提高其局部搜索能力. 本文正是尝试在遗传算法改进方面做一些工作, 针对简单遗传算法的不足, 提出一种“适应度缩放”加“有偏外来移民”的快速收敛的遗传算法. 将该算法应用于柔性结构振动主动控制中的作动器/传感器位置及反馈增益优化问题中, 数字仿真结果表明, 对于复杂非线性约束优化问题, 它具有较好的快速收敛性和全局收敛性.

1 简单遗传算法及其不足

遗传算法是具有“生成+检测”迭代过程的搜索算法. 它以每个个体为对象对整个群体进行操作, 选择、交叉和突变是它的主要操作算子. 简单遗传算法的特点是: 采用轮盘赌选择方法; 随机配对; 采用一点交叉并生成两个子个体; 群体中允许有相同的个体存在. 其基本处理流程如下:

- (1) 将待解决问题的候选解按一定规则编码成字符串, 一个字符串就是一个基因个体;
- (2) 随机产生一组初始群体;
- (3) 采用适应度值检测评估群体中每个个体的优劣;
- (4) 运用选择、交叉和突变算子对群体实行遗传操作, 以产生新一代群体;
- (5) 如果终止条件已满足则停止进化, 否则转入(3).

这样, 一代一代群体朝着得到更好解的方向进化.

简单遗传算法中, 利用性和搜索性是始终存在的影响遗传算法收敛速度和全局收敛性的一对矛盾^[5]. 利用性主要通过选择算子实现, 搜索性主要通过交叉和突变算子实现. 通过改变选择压力, 可以调整适应度高的个体被选中的机会. 进化初期选择压力比较大, 适应度高的个体纷纷被选中, 这些个体很快控制了进化过程, 造成群体过早收敛. 进化后期群体中个体差异较小, 选择压力减小, 使收敛速度大大降低. 交叉和突变算子是对解空间新区域进行搜索的有效方法. 交叉率高会使群体原有的高质量个体的淘汰速度高于交叉产生高质量个体的速度, 难以达到进化效果; 交叉率低会使搜索过程停滞不前. 突变率低则算法搜索解空间的效率低, 突变率高则趋于随机搜索. 因此, 交叉率和突变率的选择是很微妙的. 如果进化过程中这两个控制参数保持一个定

值, 则很容易导致过早收敛.

2 一种快速收敛的遗传算法

为了克服简单遗传算法过早收敛和收敛速度慢的缺点, 作者认为应该合理调整选择压力和动态改变群体结构, 因此提出了一种能较好解决利用性和搜索性矛盾的快速收敛的遗传算法.

2.1 “适应度缩放”的遗传算法

“适应度缩放”法的基本思想是: 在进化初期, 缩放值取得较小, 对于适应度接近群体平均适应度的个体, 使其适应度离开群体平均适应度, 呈“放”的趋势, 而对适应度远离群体平均适应度的个体, 使其适应度靠近群体平均适应度, 呈“缩”的趋势, 这样可避免过早收敛; 进化中期到后期, 逐渐增大缩放值, 对适应度接近群体平均适应度的个体, 其适应度逐渐由“放”到“缩”, 而对适应度远离群体平均适应度的个体, 其适应度逐渐由“缩”到“放”, 这样可以加快收敛速度. 由此可见, 适应度缩放法有效地解决了选择算子在实现遗传算法利用性方面的缺点.

设 $f_j(k)$ 为第 k 代群体中第 j 个个体的适应度, $f'_j(k)$ 表示经缩放处理后第 j 个个体的适应度, $\bar{f}(k)$ 为第 k 代群体的平均适应度. 于是有

$$f'_j(k) = \begin{cases} \bar{f}(k) + \zeta [f_j(k) - \bar{f}(k)] / \mu_1^\zeta & f_j(k) \geq \bar{f}(k) \\ \bar{f}(k) - \zeta [\bar{f}(k) - f_j(k)] / \mu_2^\zeta & f_j(k) < \bar{f}(k) \end{cases} \tag{1}$$

式中: $\zeta \in (0, 1)$ 为缩放值, 每经过一代进化就增加一个缩放步长 $\sigma > 0$, 即 $\zeta(k+1) = \zeta(k) + \sigma$;

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \max_j f_j(k) - \bar{f}(k) \\ \mu_2 &= \bar{f}(k) - \min_j f_j(k) \\ \mu &= \frac{1}{2} \min(\mu_1, \mu_2) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

2.2 引入“有偏外来移民”的遗传算法

引入“有偏外来移民”算法的基本思想是: 在遗传算法进化的中后期, 群体的结构趋于相近, 因而搜索空间中新区域的效率大大降低, 这是造成算法不能快速收敛的主要原因. 通过引入一些和群体中个体差异较大的新个体, 即外来移民, 打乱群体结构, 以提高搜索新区域的效率. 我们的研究表明, 该算法的收益远大于动态调整交叉率和突变率, 有效地解决了交叉和突变算子在实现搜索性方面的缺点.

定义 在引入新个体时,若个体中等位基因以概率 0.5 取“0”或“1”,则称此个体为无偏个体;若个体中等位基因取“0”或“1”的概率不等于 0.5,则称此个体为有偏个体,并称等位基因取“0”或“1”的概率为偏离度。

本文中偏离度的计算如下

$$P_b = 0.1 + 0.4e^{-aH} \quad (a > 0, H = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

式中: H 为当前进化代数; a 为偏离均匀分布的强度。

可以看出,进化过程中偏离度 P_b 从初值 0.5 开始逐渐减小,强度由 a 决定, a 的作用相当于模拟退火算法中的“温度”。

2.3 快速收敛的遗传算法的实施

由以上分析可知,当“适应度缩放”的遗传算法进化到中后期,缩放值 ζ 增大到一定程度时,即对高适应度个体适应度值的“放”和对低适应度个体适应度值的“缩”到了一定程度时,群体逐步趋于收敛。此时,可引入“有偏外来移民”改变群体结构,提高搜索新区域的效率。因此,两种方法的结合可以有效解决遗传算法收敛速度和全局收敛性这一对矛盾。算法实施步骤如下。

(1)对被优化参数编码。本文采用二进制编码,若优化参数的范围为 $x^L \leq x \leq x^U$,则十进制参数值向二进制码串的映射由下式给出

$$x = x^L + \frac{(x^U - x^L)y}{2^l - 1} \quad (4)$$

式中: l 为二进制码串长度; y 为二进制码串对应的十进制整数,且 $0 \leq y \leq 2^l - 1$ 。

(2)随机产生初始群体。

(3)计算适应度,并按式(1)和式(2)进行适应度缩放。

(4)进化到某一代时,则按式(3)计算的偏离度引入外来移民,否则直接进入(5)。

(5)执行选择、交叉和突变操作,以得到具有更高平均适应度的下一代群体。选择算子采用轮盘赌,该方法与适应度缩放能较好配合;交叉算子采用两点交叉,交叉点和交叉个体随机产生;突变算子将个体的某一位基因进行补运算,突变个体及突变位置都采用随机方法产生。

(6)判定是否达到终止条件,如果达到则进化结束,如果未达到则执行(3)。终止条件采用规定遗传代数。

3 遗传算法的应用

3.1 应用模型

在柔性结构的振动主动控制中,优化作为主动控制器件的作动器/传感器的位置和反馈增益是十分重要的工作。一般地,柔性结构的振动主动控制系统模型为下列形式的状态方程

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \mathbf{A}X(t) \\ Y(t) = \mathbf{C}X(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{D}_0 + \mathbf{B}(\mathbf{x}_a)\mathbf{G}\mathbf{B}(\mathbf{x}_a)^T) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= [\mathbf{0}_{m \times n} \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}_a)^T] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{M} = \text{diag}[1]$ 为 $n \times n$ 正则质量矩阵, $\mathbf{K} = [\omega_i^2]$ 为 $n \times n$ 正则刚度矩阵, $\mathbf{D}_0 = \text{diag}[2\xi_i\omega_i]$ 为 $n \times n$ 正则阻尼矩阵, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_a) = [\phi(x_{a1}), \dots, \phi(x_{am})]$ 为 $n \times m$ 输入矩阵, $\phi(x)$ 为振型矢量, \mathbf{G} 为 $m \times m$ 反馈增益矩阵, m 为离散作动器/传感器数目, n 为受控模态数目。

本文从有效衰减振动能量的角度出发,采用系统总储能积分最小优化准则

$$\begin{cases} \min_{x_a, G} W(x_a, G) \rightarrow x_a^*, G^* \\ \text{s. t. } x_a \in \lambda_a, G \in \Omega \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_a 为作动器/传感器位置; λ_a 表示柔性结构上允许布置作动器/传感器的区域; Ω 为反馈增益矩阵 G 的上限。 W 的确定方法如下。

定义

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \int_{t_0}^{\infty} e^{\mathbf{A}^T t} \mathbf{Q} e^{\mathbf{A} t} dt \quad (8)$$

而 \mathbf{P} 为以下 Lyapunov 方程的解

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (9)$$

如果系统满足渐进稳定条件,则 \mathbf{A} 的特征值实部为负,方程(9)的解存在且有惟一解^[6]。于是

$$W = \frac{1}{2} X^T(t_0) \mathbf{P} X(t_0) \quad (10)$$

式中: $X(t_0)$ 为初始状态。

本文以柔性悬臂梁作为研究对象,为了便于比较,根据文献[7]选用悬臂梁参数,如表1所示。考虑前4阶模态为被控模态,对位布置2对作动器/传感器。悬臂梁受脉冲表面载荷扰动后,其初始状态设为

$$X(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.525 \ 0.292 \ 0.171 \ 0.122]$$

表 1 悬臂梁参数

物理参数		参数值
长 度 L/m		3.81
密 度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$		1.49
惯 性 矩 J/m^4		6.35×10^{-12}
弹性模量 $E/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$		2.07×10^{11}
抗弯刚度 $EJ/\text{N}\cdot\text{m}^2$		1.31
阻尼系数 ξ		0.001
前 4 阶固有频率 $\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$		0.227, 1.42 3.99, 7.85

且 $0 < x_{a1}, x_{a2} < 3.81, 0 < G_{11}, G_{12}, G_{21}, G_{22} \leq 30$.

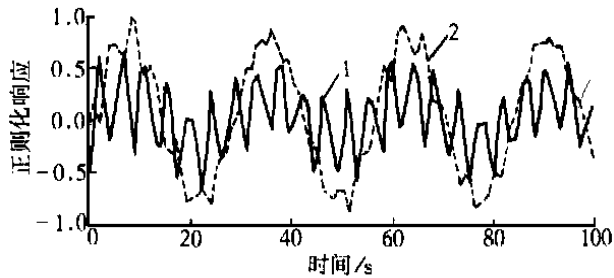
3.2 数字仿真结果及分析

遗传算法中, 群体规模取 100, 交叉率 $P_c=0.9$, 突变率 $P_m=0.007$, 缩放值 $\zeta=0.3$, 缩放步长 $\sigma=0.007$, 偏离均匀分布的强度 $a=0.007$ 12, 60 代后引入“有偏外来移民”, 移民数量取 8. 另外, 本文在求 W 的最小值问题时, 由于在 x_{ai} 和 G_{ii} 编码时已对优化准则的约束条件进行了处理, 且 W 不为 0, 故以 $1/W$ 作为适应度函数, 可将最小值问题转化为最大值问题.

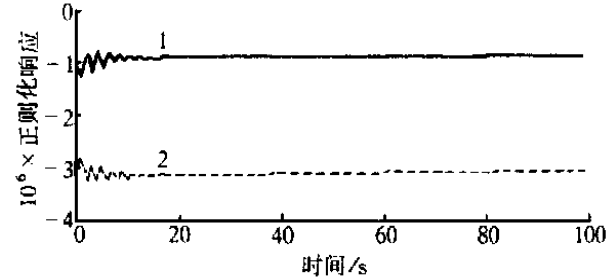
为了评价本文提出的遗传算法的性能, 作者对 准牛顿法(传统优化方法)、简单遗传算法 SGA、“适应度缩放”的遗传算法 IGA1、引入“有偏外来移民”的遗传算法 IGA2 和快速收敛的遗传算法 IGA 的进

化情况作了比较. 对于各遗传算法, 为了消除其随机性带来的干扰, 均重复 20 次计算, 结果如表 2 所示. 可以看出, 遗传算法的优化效果远优于传统优化算法, 在优化位置基本相同的情况下, 系统总储能积分优化值降低了一个数量级. IGA 与其他几种算法相比较, 有更快的收敛速度和更好的全局收敛性.

以上由快速收敛的遗传算法得到的优化结果可以用数字仿真进行检验. 图 1 和图 2 分别给出了开



(a) 开环响应



(b) 闭环响应

1: 位于 1.513 6 m 处的响应; 2: 位于 3.146 4 m 处的响应

图 1 振动输出响应曲线

表 2 各优化算法结果比较

W	进 化 代 数									
	IGA	IGA1	IGA2	SGA	准牛顿法 ^①					
0.001 90	18	18	20	20						
0.001 70	23	23	26	26						
0.001 60	27	27	45	45						
0.001 55	34	34	63	75						
0.001 50	38	38	68	×						
0.001 40	43	43	74	×						
0.001 35	63	65	85	×						
0.001 35	70	×	×	×						
0.001 30	85	×	×	×						
作动器/传感器优化位置 x_a^*/m	1.513 6	3.146.4	1.513 6	3.146 4	1.521 0	3.146 4	1.521 0	3.146 4	1.523	3.149
优化增益 G^*	29.236 8	29.882 6	29.141 3	29.530 3	28.180 1	28.884 6	18.317 4	29.882 6	8.578	7.150
	25.716 4	29.354 2	24.773 1	29.765 2	24.422 9	29.236 8	14.501 5	29.765 2	5.496	9.854

①: 该方法中的优化结果由文献 [7] 给出; ②: × 表示在 100 次进化中不能收敛到该值.
?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

环系统和闭环系统的速度输出响应(各曲线均以开环响应曲线2正则化)及它们的能量衰减情况,可见由优化了位置的作动器/传感器组成的闭环控制系统的减振效果良好.

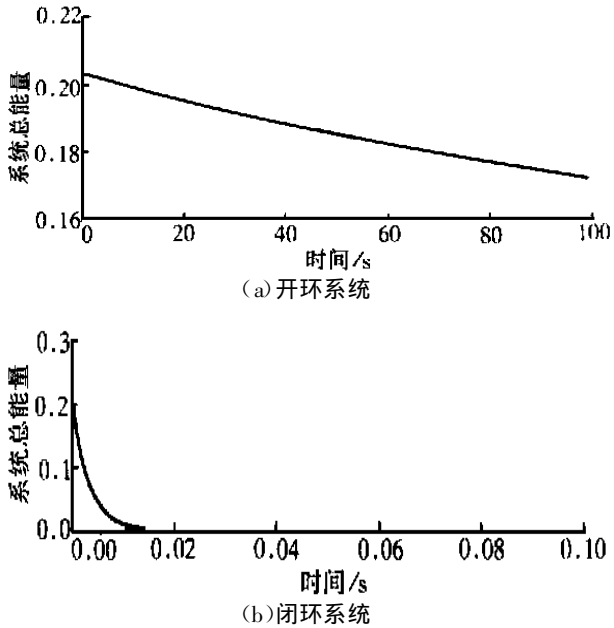


图 2 系统能量衰减曲线

参考文献

[1] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989.

[2] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. IEEE Trans on Neural Networks 1994 5 (1): 96~101.

[3] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996. 1~26.

[4] Kitano H. Empirical studies on the speed of convergence of the neural network training by genetic algorithm [A]. Proc of AAAI-90 [C]. Menlo Park, USA: The AAAI Press, 1990. 881~890.

[5] 孙增圻, 方 骞. 遗传算法及其应用[A]. 首都高校第三届自动控制学术报告会论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 1994. 178~182.

[6] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 121~140.

[7] Lee A C, Song T. Collocated sensor/actuator positioning and feedback design in the control of flexible structure system [J]. Transactions of the ASME, 1994, 116(4): 146~154.

(编辑 葛赵青)

[文摘预登]

流体渗透系数对饱和土中桩基础阻抗函数的影响

张玉红¹, 黄 义²

(1. 佛山大学土建系, 528000, 佛山; 2. 西安建筑科技大学建筑工程学院)

用间接边界元法对饱和土中桩基础阻抗函数进行了分析. 由桩基础与饱和土交界面处的协调条件和平衡条件, 建立了桩基础与饱和土动力相互作用的控制方程, 探讨了饱和土中流体渗透系数对饱和土中桩基础阻抗函数的影响. 结果表明: 饱和土中孔隙流体对饱和土中桩基础阻抗函数有一定影响, 由于饱和土中孔隙流体与骨架的相互作用, 饱和土中桩基础的动力阻抗与单相土介质中桩基础的动力阻抗有一定差别.