

遗传算法用于工程结构优化设计的研究

鹿跃丽

周力平

(郑州工业大学机械系) (河南省机械设备进出口公司, 郑州, 450002)

山本洋敬

(日本室兰工业大学)

摘 要 研究了利用遗传算法对工程结构进行优化设计的方法,在普通遗传算法的基础上,提出加入生长算子的改进措施,给出了计算实例,验证了加入生长算子的遗传算法可以用较小的群体规模,得到较高的解题速度,并且能明显提高解的最优性。

关键词 遗传算法; 工程结构; 生长算子

中图分类号 TU311.41 TB21

0 引言

遗传算法(Genetic Algorithms 简称 GA)是一种基于达尔文的进化原理发展起来的全局寻优算法。其基本原理最初由美国 Michigan 大学的 John H. Holland 教授于 1975 年提出,很快便得到了许多研究人员的重视。由于遗传算法是自然选择和进化思想在工程计算中的一种体现,因而具有很大的应用潜力,目前已被逐渐用于工程优化、信号处理、模式识别、管理决策和智能系统设计等各个领域。

1 遗传算法概述

遗传算法主要由以下几个步骤组成:(1)在整个目标函数空间产生由一组初始可行解构成的原始群体。(2)将每一个初始解转换成一个二进制字符串,每个字符串包含多个子字符串,每个子字符串是目标函数空间某一参数的二进制编码,这样一个可行解代表一个个体,多个可行解的集合被称为一个群体。(3)构造一个评价函数对原始群体中的每一个个体进行适合度评价。(4)根据适合度的大小对原始群体进行复制、交叉、突变操作,从而产生新的可行解群体。(5)收敛判定。

遗传算法不同于传统优化方法的特点在于:它采用多点搜索的方式,可以在多个可行解之间进行情报交换,因而当目标函数为多峰函数、设计空间为非凸集时,也有把握求得全局优解。而且它不需要目标函数和设计空间的连续性条件,不需要导数信息,因而具有很强的通用优化能力。

然而,由于遗传算法是一种新发展起来的优化方法,仍然存在一些问题。例如,它需要

收稿日期:1997-11-18

第一作者 女 1958 年 5 月生 硕士学位 讲师

较大的群体规模,因而导致函数值计算次数过多,耗费太多的机算时间。另外,寻优迭代到了后期,个体之间的差异变小,将使收敛速度减慢。

为了改善普通遗传算法的缺点,很多研究人员结合实际问题开展了多方面的研究。例如文献[1]提出了将遗传算法与齿行法相结合的改进遗传算法,文献[2]提出了具有动态设计变量约束空间并能取得较小群体规模的结构优化 GA 算法。随着对 GA 研究的深入,相信 GA 会得到更广泛的应用。

2 GA 在工程结构优化设计中的应用

2.1 平面桁架、平面框架的数学模型

工程结构的优化设计通常是在满足强度约束和刚度约束的条件下,使结构的总重量最轻。平面桁架、平面框架的优化问题可用如下数学模型表示:

求设计变量:

$$\{I\} = \{I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad \cdots \quad I_n\}$$

使目标函数:

$$O\{I\} = \sum_{i=1}^n C_i l_i A\{I\} \rightarrow \min$$

且满足:

强度约束

$$g_j(\{I\}) = F_{ik}(\{I\}) - F_{ai}(I_i) \leqslant 0$$

刚度约束

$$h_j(\{I\}) = x_{pk}(\{I\}) - x_a \leqslant 0$$

$$(j = 1 \sim m, k = 1 \sim NL, p \in j)$$

边界约束

$$I_{\min} \leqslant I_i \leqslant I_{\max}$$

这里,目标函数 O 是桁架或框架的总重量。 I_i 是设计变量 i 的值,即对应于设计变量的型钢的规格顺序号;在表 1 中列出了本文算例用到的型钢的规格顺序号及对应的截面面积。 C_i 是与 I_i 对应的构件的比重。 l_i 是与 I_i 对应的构件长度。 $A\{I_i\}$ 是对应于 I_i 的截面面积。 F_{ik} 为载荷条件为 k 时第 i 个构件的内力, NL 为载荷条件数目。 F_{ai} 为第 i 个构件的许用内力。 x_{pk} 为载荷条件为 k 时节点沿力 P 方向的变位, x_a 为许用变位。 I_{\min} 和 I_{\max} 是可以使用的型钢规格顺序号的最小值和最大值, $I_{\min}=1, I_{\max}=29$ 。

2.2 在普通 GA 中加入生长算子

工程结构优化设计主要采用优化准则法。但对于大部分工程结构来说,用优化准则法难以得到最优解^[3]。笔者对 GA 用于工程结构优化设计进行了研究,但用普通 GA 优化时,存在着群体规模较大、群体分布过于离散、难以收敛到最优解等问题。由于平面桁架、平面框架这样的约束优化问题,其最优解最终应收敛到起作用约束面上,因此笔者提出在普通 GA 中加上一操作步骤来改善群体分布模式的改进方法,由于这一步骤是伴随着每一世代群体的成长过程而进行的操作,所以把它叫做生长算子。生长算子由以下内容组成:

(1)当所选构件的截面规格不满足强度约束条件时,用刚好满足强度约束的截面规格代

表 1 型钢的规格顺序号及截面面积

规格 顺序号	截面面积(cm^2)	
	钢管	工字钢
1	22.72	63.53
2	29.94	71.53
3	38.36	72.38
4	54.08	84.12
5	67.55	84.30
...
27	400.50	364.00
28	451.60	528.60
29	502.70	770.10

替。

(2)计算 $k_a = \frac{x_{pk}}{x_a}$ ，将结构中的全部构件的截面面积乘以 k_a ，并选用与其最接近的截面规格。

(3)不改变构件的截面规格。
对以上三个步骤分别赋予 0.3、0.3、0.4 的操作概率。

经过这样处理后，可将群体分布向起作用约束边界移动，相当于对群体的基因模式进行了方向性改良。

加入生长算子的 GA 的程序框图见图 1。

2.3 计算实例

2.3.1 22 杆桁架的优化结果及分析

如图 2 所示的 22 杆桁架，在节点 A、B、C、D 处作用有载荷 $P1=420\text{kN}$ (或 $P1=20\text{kN}$)，在节点 E、F、G、H 处作用有载荷 $P2=20\text{kN}$ 。考虑到受力相似的构件规格应尽量一致，可以从材料供应、施工方面降低成本，选定 12 个设计变量，设计变量与构件编号之间的关系见表 2。构件全部采用钢管。现分别用满应力准则法、普通 GA 和加入生长算子的 GA 进行优化。用普通 GA 和加入生长算子的 GA 进行优化时，取群体规模分别为 20、40、60、80、和 100，交叉概率为 0.6，交叉方式为一点交叉；突变概率为 0.01。计算程序由加入生长算子的 GA 主程序和结构分析子程序组成，在迭代过程中需要进行结构分析时调用结构分析子程序。程序用 Fortran 语言编写，计算结果见表 3。对应于设计变量的数字是所采用的型钢规格序号， O_{\min} 是群体中最优点的目标函数值，括号中的数据是收敛时的世代数，表中最下栏为用满应力准则法优化的结果。

由表 3 可知，利用普通 GA 进行优化时，当群体规模较大时结果较好，当群体规模较小时，由于搜索点数较少，出现了早熟性收敛，所得结果甚至不如用满应力准则法所得的结果，只有当群体规模为 100 时，其结果才刚刚优于满应力准则法的结果。另外，利用普通 GA 优化，目标函数收敛时的世代数较大，说明其收敛速度较慢。利用加入生长算子的 GA 优化，虽然也是当群体规模较大时结果较好，但群体规模的影响不明显。其优化结果远优于用普通 GA 优化的结果，而且目标函数收敛时的世代数不大，说明收敛速度较快。例如当群体规模为 80 时，经过 15 代就收敛到了最优解 $O_{\min}=424942(\text{cm}^3)$ ，虽然还不能确定这个解是否为真正最优解，但加入生长算子的效果是很明显的。

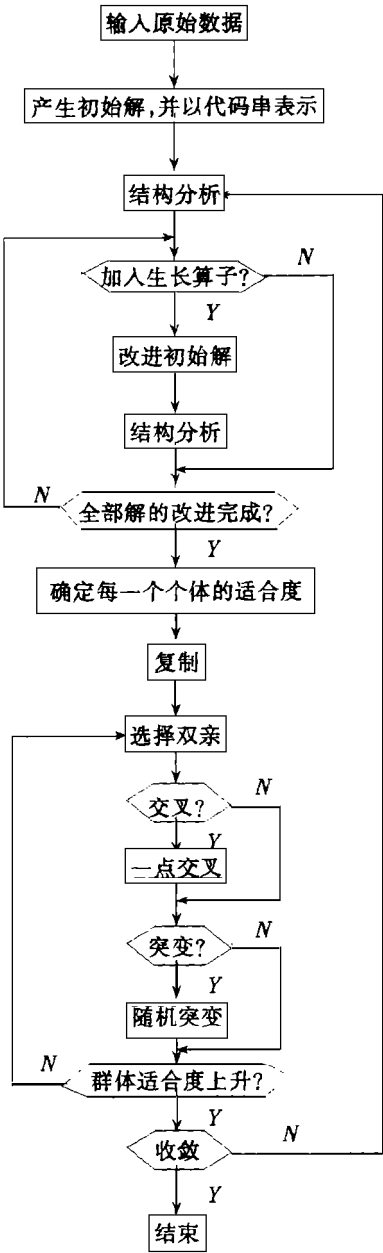


图 1 加入生长算子的 GA 程序框图

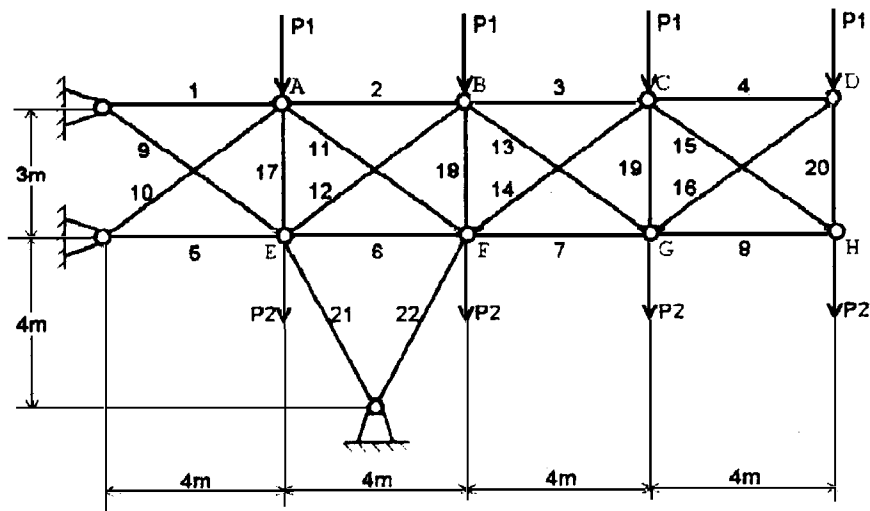


图 2 22 杆桁架结构示意图

表 2 22 杆桁架设计变量与构件编号的关系

设计变量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
构件编号	1, 4	2, 3	5, 8	6, 7	9	10, 12 13, 15	11, 16	14	17, 19 20	18	21	22

表 3 22 杆桁架的优化结果

方法	群体规模	设计变量												$O_{\min}(\text{cm}^3)$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
普通 GA	20	4	9	3	13	2	2	3	12	7	5	7	14	676740(39)
	40	3	7	5	7	1	3	2	6	8	8	1	11	547306(38)
	60	3	7	5	8	2	3	2	6	3	9	1	14	519810(43)
	80	3	7	3	5	1	3	2	9	3	9	1	11	465310(49)
	100	4	8	1	4	1	1	4	7	1	4	1	10	434886(49)
加入生长算子的 GA	20	4	8	3	4	1	1	3	7	1	4	2	10	434910(25)
	40	4	8	2	3	1	1	3	7	1	4	1	10	424942(20)
	60	4	7	2	5	1	1	3	7	2	4	1	10	434040(21)
	80	4	8	2	4	1	1	3	7	1	4	1	10	424942(15)
	100	4	8	2	4	1	1	3	7	1	4	1	10	424942(16)
满应力准则法		4	7	2	5	1	2	3	7	1	4	1	10	441982

2.3.2 9 杆框架的优化结果及分析

如图 3 所示 9 杆框架,在 A、B、C 处分别作用有载荷 $P=200\text{kN}$,在构件 4、5、6 上分别作用有分布载荷 $q=30\text{kN/m}$,构件全部采用工字钢,其规格顺序号及截面面积见表 1。为了减少构件规格,确定了 5 个设计变量,设计变量 1 表示构件 1、2、3 的截面规格;设计变量 2、3、4 分别表示构件 4、5、6 的截面规格,设计变量 5 表示构件 7、8、9 的截面规格。其优化结果见表 4。对于平面框架的优化设计,利用普通 GA 所得结果优于用满应力准则法所得

结果,并且当群体规模较大时结果较好。而利用加入生长算子的 GA 优化,其结果与群体规模的大小无关,都远远优于用普通 GA 时的结果。例如用加入长算子的 GA 优化,即使群体规模最小取为 20,也可以得到最优解。可见加入生长算子可以大大减小群体规模,从而减少计算时间,提高 GA 的效率。

3 结论

综上所述,GA 作为一种多点寻优算法用于工程结构优化设计是一种可行、有效的优化方法。根据实际应用问题对普通 GA 进行改进,可以提高 GA 的可靠性及效率。本文提出的在普通 GA 中加入生长算子的方法可以改善群体分布模式、改进搜索方向,从而可以用较小的群体规模得到较高的解题速度,同时可以明显提高解的最优性。

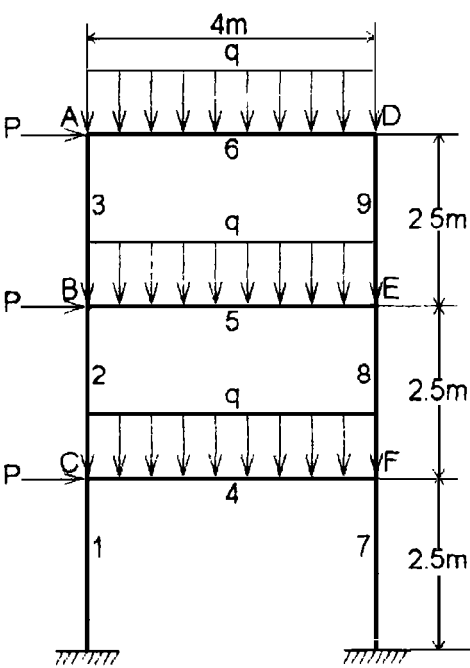


图 3 9 杆框架结构示意图

表 4 9 杆框架的优化结果

群体规模	普通 GA						加入生长算子的 GA					
	设计变量					$O_{\min}(\text{cm}^3)$	设计变量					$O_{\min}(\text{cm}^3)$
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
20	27	19	15	21	16	647620(13)	19	25	17	11	20	571660(10)
40	25	23	13	18	20	644110(18)	19	25	17	11	20	571660(16)
60	25	25	6	21	20	654140(14)	19	25	18	11	20	578860(18)
80	18	25	17	13	24	620640(48)	19	25	17	11	20	571660(8)
100	19	25	14	17	20	582100(44)	19	25	17	11	20	571660(12)
满应力准则法						$\{I\}=\{1,27,27,11,28\}$	$O_{\min}=787818$					

参考文献

1 [日]杉本博之,山本洋敬・トラス构造物の离散的最适化问题への GA の应用关する 基础的研究,第 10 回システム 工学部会研究会资料,1993,181~186

2 王石刚等・一种小群体规模的结构优化 GA 算法・武汉:华中理工大学学报;1995,23(11);18~22

3 张炳华,候昶・土建结构优化设计・上海:同济大学出版社;1988

(下转 61 页)

参考文献

- 1 陈荣耀. 工程热力学及传热学. 北京: 农业出版社. 1992, 10
- 2 刘恩臣. 太阳能热水器保温性能测算. 北京: 中国科学技术出版社. 1995, 11

The Parametric Equation of Solar Energy All-glass Vacuum Collector Tube and the Measurement

Yang Manxiang Zhang Yingsheng Liu Enchen Ma Guangyuan
(Zhengzhou University of Technology)

Abstract This paper discusses the parametric equation of heat waste coefficient, heat preservation rate and time constant of solar energy all-glass vacuum collector tube and gives three kinds of calculating methods.

Keywords vacuum collector tube; heat waste coefficient; heat preservation rate; time constant

(上接 39 页)

Studies on the Optimal Design of Engineering Structure Using Genetic Algorithms

Lu Yueli
(Zhengzhou University of Technology)
Zhou Liping
(Henan Machinery and Equipment Imp. and Exp. Corporation)
Yamamoto Yokei
(Muroran Institute of Technology)

Abstract The optimal design of engineering structure using genetic algorithms was studied, the improvement of GA with growth operator was proposed, and some examples prove the GA with growth operator can achieve a higher computing speed and optimum with smaller population size.

Keywords genetic algorithm; engineering structure; growth operator