

文章编号:1007-6492(2002) 01-0104-04

遗传算法在路面材料参数识别中的应用研究

刘凤娥,蔡迎春,乐金朝

(郑州工业大学环境与水利学院,河南 郑州 450002)

摘 要: 针对标准的遗传算法收敛速度慢的特点做了几点改进:在群体初始化中,以均匀产生初始群体代替随机产生;实行截断选择,隐含了最优保存策略;动态变异,将改进后的遗传算法和系统识别原理相结合,应用于路面反分析中.分别对理论数据和实测数据进行了计算分析,并和目前国内国际较通用的软件计算结果进行了比较分析.结果表明,改进后的遗传算法收敛速度快,具有较强的全局优化能力,利用该算法进行路面反演可以避免解病态方程,反演结果稳定可靠.

关键词: 遗传算法;路面;模量反算

中图分类号: U 416 **文献标识码:** A

路面反分析方法总体上可分为两大类:一类是非迭代方法,主要包括图解法、数据库搜索法.这种方法避开了“病态”问题,但理论上不够严谨,实用上还有一定的局限性;另一类是迭代法,以基于目标函数局部微分特性的方法最为常见,这类方法往往存在“病态”问题,处理病态方程要用到奇异值分解等复杂的数学理论.而遗传算法是一种随机、自适应的启发式方法,具有许多优良特性.自 70 年代Holland 教授提出遗传算法以来,许多学者对遗传算法提出了种种的改进措施,理论上不断地发展,应用领域也在不断扩大.本文将遗传算法应用于路面反分析中,根据路面的实测弯沉盆来反求路面的弹性模量,并对算法的操作过程作了一些改进.

1 遗传算法及其改进

1.1 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)是基于达尔文进化论学说,模拟生物的进化过程的一种搜索机制.一般的GA操作过程是通过随机产生一组以染色体形式表示的候选解,称作初始群体,每个个体有其适应周围环境的适应度;通过循环操作选择、杂交、变异三个主要的算子以模拟生物进化,使群体不断进化,最终搜索到最优解和准最优解.选择算子使适应值高的个体有较高的复制概率,通过它可以实现优胜劣汰,使群体的性能提

高;交叉算子是两个染色体间相互交换一些信息,由此产生更好的染色体,它是进化的主要手段;变异是为了找回丢失的有效基因信息,通过它也可以避免算法过早收敛,维持群体的多样性.GA 虽属随机优化方法,但选择操作算子使它具有一定的方向性,因而是一种有效的全局优化方法.

1.2 遗传算法的改进

简单的遗传算法易于操作,但收敛速度比较慢.本文用以下措施来改进遗传算法的性能.

1.2.1 染色体的编码、初始化群体

最常用的染色体编码方法是二进制编码.为了避免编码、译码的繁琐过程,本文算法采用浮点数编码方案.浮点数编码是把各个决策变量值直接作为染色体的基因.

初始群体的好坏对算法的收敛速度有较大的影响.一般遗传算法的初始群体为随机产生,这虽然对群体的多样性有利,但可能把好的模式遗漏掉,而搜索所有必要的和不必要的空间.也可能会产生相似的个体,多次搜索同一个部位.本算法的初始群体不是随机产生,而是使初始群体均布在各个参数的取值区间内,使初始群体基本涵盖了所有可能的模量组合模式.即把各个参数的取值区间 n 等分(n 不能太大, n 的增加会导致初始值评估的计算量以幂的速度增加),使各个参数分别取值为等分点上的值,然后组合所有可能的结果,产生一个群体 $m_0 = (n + 1)^m > m$, (m 为决策变

收稿日期:2001-10-15;修订日期:2001-12-10

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(994050300)

作者简介:刘凤娥(1973-),女,河南省洛阳市人,郑州大学硕士研究生,主要从事优化理论方面的研究.

量个数, m 为遗传算法操作的群体规模), 根据各染色体的适应值, 选择 m 个最优的个体作为初始群体, 淘汰较劣的其它 $m_0 - m$ 个个体. 这样就保留了较多的优良模式, 可以很大程度上加快算法的收敛速度.

1.2.2 交叉和变异操作

杂交为算术交叉, 对于随机选取的两个染色体 X, Y , 按以下方式杂交:

$$\begin{cases} X' = X \cdot \lambda_1 + Y \cdot \lambda_2; \\ Y' = X \cdot \lambda_2 + Y \cdot \lambda_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$; $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 且 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$.

变异为非均匀变异. 对于随机选取的父亲 X , 若元素 x_k 被选出做变异, 则后代为

$$X'' = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n). \quad (2)$$

其中, x_k 按以下两种可能的方向变异

$$x'_k = x_k + \Delta(t, x_k^U - x_k); \quad (3)$$

或
$$x'_k = x_k - \Delta(t, x_k - x_k^L). \quad (4)$$

式中: x_k^U, x_k^L 分别表示节 k 个决策变量的上下限. 函数 $\Delta(t, y)$ 随进化代数 t 增加而减小(t 是代数), $\Delta(t, y)$ 给出如下

$$\Delta(t, y) = y \cdot r \cdot (1 - \frac{t}{T})^b. \quad (5)$$

式中: r 为随机数; T 为最大进化代数; t 为当前进化代数; b 为确定不均匀度的参数.

1.2.3 选择、复制

一般的遗传算法的选择算子是赌盘法, 即按照个体的适应度确定个体复制到下一代的概率, 不能完全保证最好的个体被复制到下一代. 本文的选择策略是截断选择, 即按照染色体的适应值由大到小排序, 按照其排列位置确定其进入下一代与否. 选取子代的较优的 $3m/4$ 个个体, 淘汰较差的 $m/4$ 个个体, 选取父代中的较优的 $m/4$ 个个体, 共同构成下一代父体. 文献 [1] 对遗传算法的交叉因子、变异因子作了改进, 但没有让最优个体参与交叉、变异运算, 一定程度上延缓了进化速度. 本复制策略可以使最好的个体也参与遗传操作, 与其它个体相比, 更有可能产生好的后代; 同时, 本选择策略隐含了最优保存策略, 保证了算法的单调收敛.

2 路面反演的遗传算法

路面模量反演, 就是根据 FWD 等公路无损检测仪器测得的弯沉盆数据, 利用力学理论和数学方法, 通过弯沉盆的拟合来识别路面的材料特性

参数. 高等级路面各层材料的工作特性接近于线性弹性假设, 因此, 本文反演模型为多层弹性体系.

2.1 路面反演目标函数的确定

由于反演过程是通过弯沉盆的拟合来实现的, 因此, 目标函数确定为 FWD 各个传感器位置处的计算弯沉和实测弯沉的相对误差和与最大相对误差的和. 这样是为了防止出现平均误差较小而个别样本误差太大的情况, 即

$$e = \max \left[\frac{|w_{ci} - w_{mi}|}{w_{mi}} \right] + \sum_{i=1}^{nd} \frac{|w_{ci} - w_{mi}|}{w_{mi}}, \quad (6)$$

式中: w_{ci} 为计算弯沉; w_{mi} 为实测弯沉; nd 为 FWD 传感器的个数, 即弯沉盆的控制点数.

2.2 初始解的确定

根据路面的材料特性, 估计一个大概合理的模量范围, 按照 1.2.1 所述方法初始化群体, 它基本覆盖了所有可能的模量范围与组合方式.

若用 DNA_i 表示群体中的第 i 个染色体, 用 E_i 表示其对应的模量参数, $e_\epsilon > 0$ 表示给定的误差限, E^* 表示所求的最优模量参数, t 表示进化代数, T 表示最大进化代数, 则基于遗传算法的路面反演过程可以表述如图 1 所示 [1].

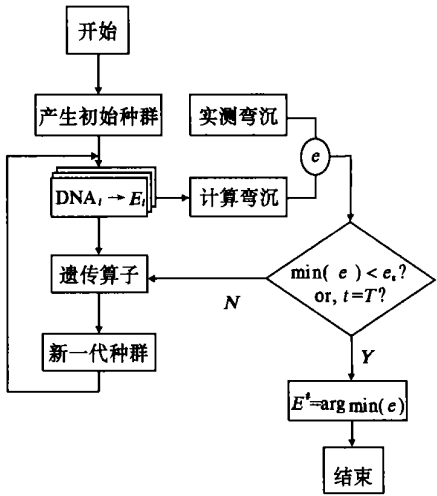


图 1 识别路面未知系统的遗传算法流程图
Fig. 1 How chart of GA method for identifying pavement unknown system

3 数值结果

为了考评本算法的搜索效果, 分别对理论弯沉数据和实测弯沉数据进行计算分析, 同时也与国际通用软件 SIDMOD, MODULUS 进行了比较.

3.1 理论数据反算分析

根据已知的路面结果模型, 采用美国壳牌石油公司 BISAR 程序计算出路表的相应于 FWD 传

传感器位置处的数点弯沉,然后将计算出的弯沉当作已知的实测弯沉,把模量当作未知,根据路面结构假定各层的模量范围,反演路面各层的模量,实验结果如表 1 所示.本算例中,群体规模为 24,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.5,不均匀度参数 b

为 0.8.停止准则为:①4 层路面结构迭代最大代数为 500 代 2,3 层路面结构迭代最大代数为 200 代;②连续 50 代适应值无变化;③适应值小于 0.001.从表 1 可以看出,用 GA 对理论弯沉盆反演结果比较可靠.

表 1 反算精度的比较

Tab.1 Comparison of the back calculation precision

路面 编号	结构 层	材料 类型	结构层 厚度/mm	假定 模量/MPa	反算模量/MPa			误差/%		
					MODULUS 法	SIDMOD 法	GA 法	MODULUS 法	SIDMOD 法	GA 法
1	1	AC	76.2	3447.4	3321.2	3433.6	3456.4	3.66	0.40	-0.26
	2	GB	152.4	344.7	352.3	334.4	344.2	-2.20	3.00	0.15
	3	SG	—	137.9	137.9	138.6	137.9	0.00	-0.50	0.00
2	1	AC	152.4	2068.4	2144.3	2103.6	2068.4	-3.67	-1.70	0.00
	2	GB	304.8	413.7	407.5	399.2	413.7	1.50	3.50	0.00
	3	SG	—	68.9	68.9	68.9	68.9	0.00	0.00	0.00
3	1	AC	203.2	6894.8	6685.8	6981.6	6887.9	3.03	-1.26	0.10
	2	CTB	152.4	13789.5	14692.0	13377.9	13793.5	-6.54	2.99	-0.03
	3	SG	—	137.9	138.6	137.9	137.9	-0.50	0.00	-0.02
4	1	AC	127	4136.9	4476.8	4053.4	4140.7	-8.22	2.02	0.09
	2	PCC	254	27579.0	19059.9	30108.7	27270.0	30.89	-9.17	1.12
	3	LTB	203.2	689.5	1757.5	433.0	730.8	-154.90	37.2	-5.99
	4	SG	—	172.4	170.3	173.7	172.3	1.20	-0.80	0.07

说明:1.本表原始数据摘自文献[2].2.路面材料:AC 为沥青混凝土;GB 为级配粒料基层;CTB 为水泥稳定基层;LTB 为石灰稳定基层;PCC 为水泥混凝土;SG 为路基.

3.2 实测数据反算分析

本算例采用的数据为文献[3]中表 8.5 及附录 2 给出的实测数据.已知路面结构模型[4]为如图 2 所示的三层的路面结构体系.其中,面层厚度为 101.6 mm,泊松比为 0.40;基层厚度为 254.0 mm,泊松比为 0.35;土基厚度为无限深泊松比为 0.40.各层模量均为未知.

已知落锤式弯沉仪(FWD)的加载板半径为 150.0 mm.7 个传感器距加载中心的位置分别为 (mm):0.0, 304.8, 609.6,914.4, 1219.2,1524.0, 1828.8.根据上述已知的路面模型和图 1 所示的方法,以及已知的加载力与测试弯沉值(参见文献[3]中的表 8.5),反算出的路面各层模量值如表 2 所示.为了和目前较通用的方法反算结果进行比较,将用 MODULUS 法、SIDMOD 法反算结果一并列入表 2.本算例中,群体规模 24,交叉概率 0.9,变异概率 0.5,最大代数 60,停止准则为:①20 代内,群体中最小适应值无变化(适应值越小越好);②最小适应值小于 0.1;③达到最大代数.

从表 2 可以看出,除面层的个别点外,用 GA 对实测弯沉盆反演结果与 MODULUS 法、SIDMOD 法的反演结果基本一致.

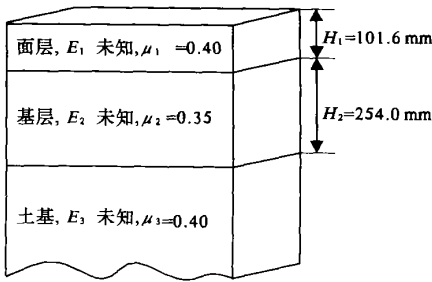


图 2 路面结构模型

Fig.2 Pavement structure model

4 结束语

本文主要是尝试了遗传算法在路面反分析中的应用,并对遗传算法提出了一些改进措施;通过对理论弯沉盆和实测弯沉盆的反演分析,得出了比较稳定、精度较高的结果,说明把遗传算法应用在路面反分析中是可行的.需要说明的是,遗传算法作为一种随机的优化方法,虽然具有一定的方向性,但没有基于灵敏度分析优化算法方向性强,所需机时较长[1].怎样提高遗传算法的收敛速度,仍是一个值得研究的问题.对于没有实时要求的问题,遗传算法具有较高的应用价值.

表 2 GA 反演结果与SIDMOD 法、MODULUS 法反演结果的对比
Tab .2 Comparison the results by GA with the results by MODULUS and SIDMOD

序号	桩号	面层模量/MPa			基层模量/MPa			路基模量/MPa		
		MODULUS 法	SIDMOD 法	GA 法	MODULUS 法	SIDMOD 法	GA 法	MODULUS 法	SIDMOD 法	GA 法
1	0.041	7832.0	7766.3	7901.0	48.2	49.1	49.7	94.9	93.3	93.5
2	0.104	6925.7	6741.9	6413.9	114.3	120.1	120.1	101.5	100.3	100.8
3	0.214	3479.9	3879.8	3887.0	40.4	34.5	34.5	134.8	134.2	136.7
4	0.295	1913.3	1948.4	2171.6	50.0	48.0	46.6	147.1	145.9	145.2
5	0.418	3950.4	3945.6	4039.7	34.5	34.5	34.5	80.6	79.0	79.3
6	0.501	1732.9	1769.5	1654.0	34.5	34.5	34.5	55.4	54.4	55.2
7	0.604	3827.2	3340.7	3438.3	70.5	80.5	81.3	84.7	82.9	82.7
8	0.708	8273.7	8046.9	8273.7	49.6	51.7	55.1	113.0	110.4	112.8
9	0.803	8273.7	8273.7	8273.7	689.5	673.7	689.5	113.7	111.2	111.4
10	0.948	2519.1	2578.7	2837.9	52.9	50.8	50.3	171.2	170.9	170.5
11	1.027	1953.3	2260.1	2174.6	195.3	126.3	128.8	195.3	199.3	200.0
12	1.103	1872.0	1379.0	1386.2	56.2	34.5	34.5	187.2	186.2	188.5
13	1.201	8273.7	8273.7	8273.7	69.6	81.4	85.6	229.5	220.5	218.9
14	1.348	4136.3	4517.2	4001.9	37.6	34.5	34.5	125.4	124.9	125.1
15	1.402	7285.3	7330.1	7370.3	97.3	97.2	96.8	195.2	192.4	192.5
16	1.508	8273.7	8273.7	8273.7	238.8	221.3	222.2	236.0	197.0	196.9
17	1.600	6748.0	8273.7	8273.7	47.3	48.5	48.9	157.8	185.7	190.9
18	1.706	1868.8	1900.7	1422.4	37.4	34.5	34.5	124.6	121.6	125.0
19	1.801	7106.9	7052.9	7125.0	76.3	78.5	78.2	187.5	183.0	186.2
20	1.902	8273.7	8273.7	8273.7	55.9	72.2	78.4	186.4	179.2	177.7

参考文献：

[1] 王宏伦,吕庆风.基于遗传算法的自学习模糊逻辑系统[J].控制与决策,2000,15(6) :658—661.

[2] 钟燕辉.路面结构层模量及路基深度反算方法研究 [D] ·郑州:郑州工业大学,2000.

[3] 王复明,刘文廷.高等级公路无损检测与CAE 技术研究专题研究总报告[R] ·郑州:郑州工业大学,1996.

[4] 钟燕辉,王复明,蔡迎春,等.路面结构层厚度误差对模量反算结果的影响[J].郑州工业大学学报,2000,21(1) :30—33.

[5] 刘迎曦,王登刚,李守巨,等.识别混凝土坝弹性模量的一种新方法[J].大连理工大学学报,2000,40(2) :144—147.

[6] 周 明,孙树栋.遗传算法原理及应用 [M] ·北京:国防工业出版社,1999.

Application Research of Genetic Algorithm in the Back - calculation
of Pavement Material Properties

LIU Feng - e , CAI Ying - chun , YUE Jin - chao
(College of Environmental & Hydraulic Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract : Considering the slow convergence speed of ordinary GA , several improvement methods are provided : generating the initial population uniformly substituted the ordinary stochastical procedure ; Applied interceptive selection which connote preserving the best one strategy ; Dynamic mutation was employed also . By combining the improved GA and system identifying method , the method is applied to the pavement back - calculation . Analyzed the theoretic data and measured data respectively by GA method . This paper compares the results obtained by GA method with the results obtained by using the popular methods . The results show that the improved GA has a fast convergence speed and strong global optimization ability . It is free for m solving ill - condition equations and the results are steady and reliable .

Key words : genetic algorithm ; pavement ; module back - calculation