

文章编号:1671-6833(2011)06-0063-04

基于 microGA 和有限元的混凝土坝热学参数反分析

刘银芳^{1,2}, 陈国荣², 尤国英¹, 江超³

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所无锡分部, 江苏 无锡 214151; 2. 河海大学 工程力学系, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 热学参数的选取, 对混凝土坝温度场的计算有重要影响. 这些参数值多为试验或经验公式得来, 由于混凝土热学性质和外界环境的复杂性, 及试验的局限性, 很难得到较为精确的参数值. 为解决此问题, 利用微遗传算法对混凝土坝热学参数进行反分析. 结合三维不稳定温度场有限元计算原理, 编制了微遗传算法的三维不稳定温度场反分析程序, 并给出了计算实例, 结果表明: 与简单遗传算法相比, 微遗传算法减少了计算量, 采用重启操作使种群具有很好的多样性, 避免了早熟现象, 更适合工程应用.

关键词: 混凝土; 热学参数; 反分析; 遗传算法

中图分类号: TU621; TP31

文献标志码: A

0 引言

在大体积混凝土坝温度场^[1]计算中, 通过施工现场实测温度资料的反演分析来获取较为准确的热力学参数成为了一种经济、有效的方法. 但由于问题的极度非线性和复杂性, 采用传统优化算法进行反分析又经常遇到陷入局部最优解, 收敛速度过慢甚至不收敛等问题, 于是在反分析中如何选取一种高效的搜索方法就成了问题的关键所在. 由 J. H. Holland 教授提出的遗传算法^[2]因具有全局、不易陷入局部最优, 尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题的优点, 很快在反问题中得到了应用. Charles^[3]采用遗传算法建立了初始值和边界值问题的反演方法, 张宇鑫等^[4]对基本遗传算法做了改进, 并提出了反演混凝土非稳态温度场主要热学参数, 热交换系数等的通用方法, 李守居等^[5]将遗传算法与模拟退火算法相结合, 建立了用于参数识别的混合遗传算法, 应用于混凝土重力坝岩石和混凝土力学参数反演, 朱岳明等^[6]基于混凝土非绝热温升试验和有限元数值仿真计算技术, 利用遗传优化算法反演判别出混凝土的多个温度特性参数.

文献[7]给出了遗传算法收敛性的证明, 即在保证一定种群规模和保存最优解的情况下, 经过多次搜索后遗传算法总是收敛的. 但在种群进

化过程中, 评价个体适应度时都要进行温度场正计算, 而温度场正计算规模相当巨大, 收敛速度过慢或种群规模过大都会增加正计算次数, 计算量巨大. 减小种群个体数量又容易陷入局部最优, 而得到次优解. 笔者采用由 Krishnakumar^[8]提出的 micro 遗传算法(μ GA), 并对其进行改进, 编制了三维不稳定温度场反演分析程序, 程序采用二进制编码和均匀交叉、轮盘赌选择、最优保留的机制.

1 不稳定温度场计算原理

根据变分原理三维不稳定温度场问题等价于下列泛函的极值问题:

$$\Pi = \int_V \frac{\alpha}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dv + \int_V \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) T dv + \int_S \bar{\beta} \left(\frac{1}{2} T^2 - T_a T \right) ds \quad (1)$$

划分成有限个单元后, 结构的总泛函 $I(T)$ 等于各单元泛函之和, 单元的泛函为:

$$\Pi^e = \int_{V^e} \frac{\alpha}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dv + \int_{V^e} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) T dv + \int_{S^e} \bar{\beta} \left(\frac{1}{2} T^2 - T_a T \right) ds \quad (2)$$

式中: $\bar{\beta} = \frac{\beta}{c\rho}$, α 为导温系数, β 为混凝土表面放热系数, T_a 为与混凝土接触介质的温度. V^e 是单元

收稿日期: 2011-06-28; 修订日期: 2011-09-09

基金项目: 国家重点工程资助项目(2009808415)

作者简介: 刘银芳(1983-), 男, 江苏无锡人, 助理工程师, 硕士, 主要从事工程力学、大体积混凝土温控与反分析的研究, E-mail: yfliu703@163.com.

所包含的体区域, S^e 是单元放热表面的面区域.

单元内任一点的温度与温度变化率用插值函数表示为

$$T(x, y, z, \tau) = NT^e \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = N \frac{\partial T^e}{\partial t} \quad (4)$$

其中,形函数矩阵 $N = [N_1, N_2, N_3, \dots]$, T^e 为单元节点温度列阵.

将式(3)和式(4)代入式(2)后,由泛函的极值条件得不稳定温度场的求解方程

$$(H + G)T + R \frac{\partial T}{\partial t} = F \quad (5)$$

式中: H 为整体热传导矩阵, G 为放热边界对热传导矩阵的贡献矩阵, R 为整体热容矩阵, F 为整体温度荷载列阵,它们分别由各单元系数矩阵集合而成.

采用向后差分格式,由式(5)得到 t_{n+1} 时刻节点温度 T_{n+1} 的求解方程

$$\left(H + G + \frac{1}{\Delta\tau}R\right)T_{n+1} = \frac{1}{\Delta\tau}RT_n + F_{n+1} \quad (6)$$

2 micro 遗传算法的反分析原理

2.1 micro 遗传算法

遗传算法本质上是一种基于自然选择机制和遗传学的搜索方法^[9]. Krishnakumar^[8] 对一般遗传算法进行了改进,提出微遗传算法 microGA(μ GA). 基本上, μ GA 的进化策略与标准遗传算法大概相似,在 μ GA 中选择和交叉仍然是基本的 GA 操作,但取消了变异操作,加入了另外一些 GA 操作,如优先操作. 优先操作即把当代最优个体完整保留到下一代中. μ GA 使用较小的种群规模,一般来讲每代个体只需 5 ~ 10 个(标准遗传算法需 10 个以上),从而大大减小了计算量. 为保持种群中基因的多样性, μ GA 使用重启动操作. 重启动操作为:当某一代最佳个体与种群中其他个体的 Hamming 距离(计算公式见式(7))小于某个给定的阈值时,表明种群收敛于一个局部最优解,随机产生几个个体取代种群中除最优个体外的其它个体,并和最优个体一起构成新一代种群,进入遗传操作.

微遗传算法种群规模小,种群能保持良好的多样性至关重要. 由于重启动操作过程随机产生新个体,易使个体分布过于集中或过于离散,不利于全局搜索. 为了加快收敛速度,笔者对重启动操作进行改进:设定阈值,对随机产生的个体进行选择,使新一代种群中的各个体间保持一定的 Hamming 距离,从而使种群个体尽可能均匀地分布在整个解空间上.

$$\|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (7)$$

2.2 温度场反分析模型

温度场计算中,热学参数和温度相关性较强,并且温度易于测量,故采用温度反分析模型^[10]. 若仿真计算中使用的反演参数与材料实际参数相同,则在不计模型、数值计算和测量误差的情况下,应有:

$$T_{ij} = T_{ij}^0$$

而实际上,计算温度和实测值不会严格相等,反问题可以转化为求函数最小值的优化问题,取目标函数为

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} [T_{ij}(X) - T_{ij}^0]^2 \quad (8)$$

式中: ω_{ij} 为加权系数; $T_{ij}(X)$ 为有限元计算温度值; T_{ij}^0 为观测温度值; i 为测点序号; j 为观测时间序号; X 为反演参数向量.

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots]^T = [a, b, \theta_0, \dots]^T$$

通常,根据经验或试验反演参数都有一定的估计范围,即约束条件:

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

为了将反问题转化为基于遗传算法的优化问题,定义

$$f_i = 1/F_i \quad (9)$$

式中: f_i 为种群中第 i 个体的适应度函数; F_i 为目标函数值.

基于微遗传算法的温度场反分析求解流程如图 1 所示.

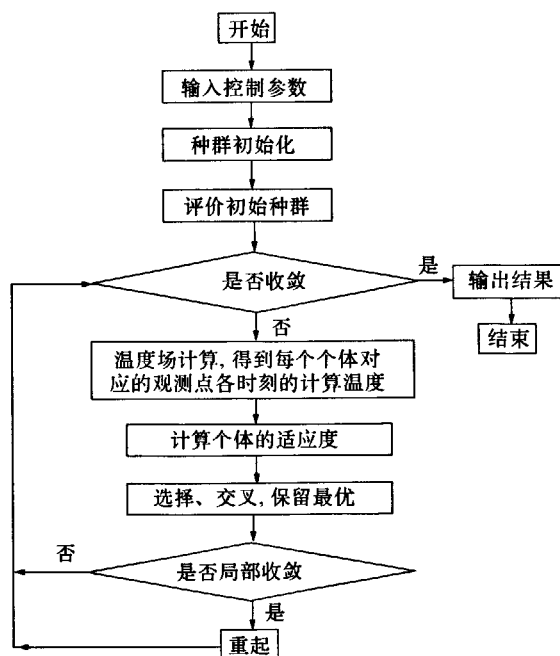


图 1 温度场反分析流程

Fig. 1 Temperature field back analysis process

3 计算实例

某碾压混凝土重力坝坝顶长 1 250 m,最大坝高 159 m.溢流坝段每个坝段厚为 20 m,考虑对称性,取一半分析.混凝土浇筑温度为 17 ℃,浇筑层厚 1.5 m 左右,间歇期 7 d,假设 4 d 拆模.通水冷却 15 d.正计算有限元模型采用空间 8 节点六面体等参单元,网格划分为 7 344 个单元,9 725 个节点模型网格如图 2 所示.

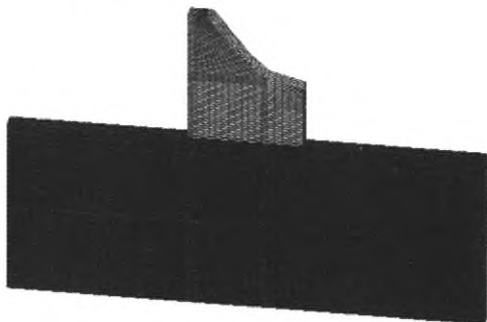


图2 模型网格
Fig.2 Model mesh

坝体材料分布如图 3 所示.材料 I(常态三级配混凝土 C₉₀20W6F100)的绝热温升参数进行反演, $\theta(\tau)$ 与龄期的关系采用复合指数式表示为

$$\theta(\tau) = \theta_0 \times (1 - e^{-a\tau^b}) \tag{10}$$

式中: θ_0 、 a 和 b 为待反演的参数.

由于没有实测资料,先作温度场正分析,设其参数为: $\theta_0 = 21.66$, $a = 0.49$, $b = 0.65$,根据试验资料 θ_0 、 a 、 b 的取值区间分别为:10.0~30.0,0.1~2.0,0.1~2.0.由于在混凝土施工过程中,受很多随机因素影响,为模拟实际效果,故把计算得到的温度加上一定扰动作为实测值进行反演分析.反演结果见表 1.由表 1 可见,结果具有较好的精度,说明反演参数是可辨识的,可以对多个参数同时反演.但由于问题具有较强的非线性,加上一定人为扰动后,结果精度降低,体现出一定的不适

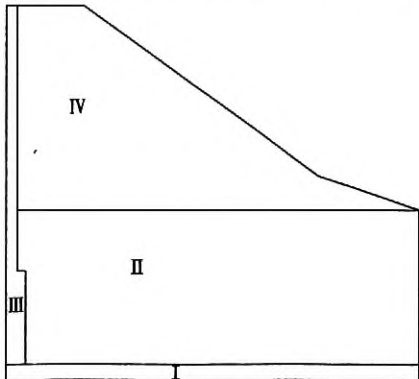


图3 坝体材料分布
Fig.3 Material of dam distribution

定性,可以增加观测点和观测时间来削弱不适应性.

表 2 为在 0% 扰动 的情况下,利用笔者改进后的微遗传算法和标准遗传算法反演得到的参数值与精确值的比较.容易看出笔者采用的方法得到的反演结果与实际值更接近,精度更好.

表 1 材料 I 计算结果

Tab.1 The calculated results of mterial

扰动	0%	-1%	-5%	1%	5%
θ_0	21.658 4	20.501 2	21.005 9	21.865 3	21.999 8
a	0.487 9	0.512 8	0.499 9	0.417 9	0.410 6
b	0.651 7	0.667 3	0.699 8	0.693 4	0.623 1

表 2 计算结果对比

Tab.2 The calculated results Comparison

参数	θ_0	a	b
反演值 μ GA	21.658 4	0.487 9	0.651 7
反演值 SGA	21.553 5	0.480 9	0.659 2
真实值	21.66	0.49	0.65

图 4 为使用相同种群个体数量的标准遗传算法反演程序和微遗传算法反演程序种群进化过程中目标函数收敛曲线的比较,由图 4 可见采用 μ GA 的反分析程序收敛速度明显较快,当种群进化 80 代左右(84 代)时就可以得到理想个体,很好的抑制了早熟现象.图 5 和图 6 给出了两个观测点观测温度值和利用反演计算得到的温度值的比较.由图可见两者很接近,基本吻合,说明反演结果能够很好的满足工程精度的要求.

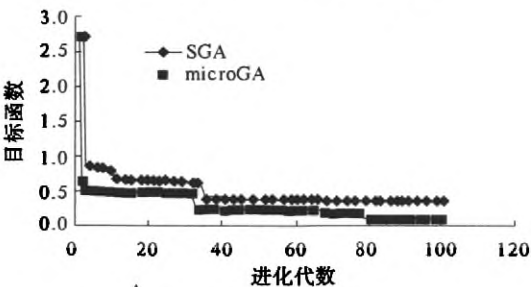


图4 目标函数收敛过程
Fig.4 The convergence process of objective function

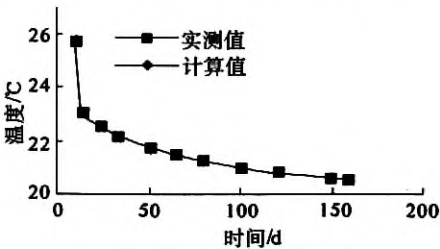


图5 1号观测点温度
Fig.5 Temperatures on measuring point 1

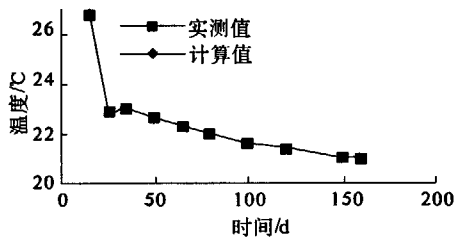


图6 2号观测点温度

Fig. 6 Temperatures on measuring point 2

4 结论

热学参数反分析对混凝土的温控防裂研究具有重要意义,能够加强对具体工程的指导.笔者采用的改进微遗传算法在混凝土三维不稳态温度场反分析中具有种群规模小、收敛速度快的优越性,克服了简单遗传算法不成熟收敛和计算量大的缺点,更适合工程应用.

参考文献:

- [1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999:4-5,660-668.
- [2] 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,1999.
- [3] KARR C L, YAKUSHIN I, NICOLSI K. Solving inverse initial-value, boundary-value problems via genetic algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13 (6): 625-633.
- [4] 张宇鑫,宋玉普,王登刚.基于遗传算法的混凝土三维非稳态温度场反分析[J].计算力学学报,2004,21(3):338-342.
- [5] 李守巨,刘迎曦,陈昌林,等.基于混合遗传算法的混凝土大坝力学参数反演[J].大连理工大学学报,2004,44(2):195-199.
- [6] 朱岳明,王弘,闪黎.混凝土热学参数反问题求解的遗传算法[J].人民长江,2004,35(11):55-57.
- [7] EIBEN A E, ARTS E H, VAN H EE KM. Global convergence of genetic algorithms: an infinite markov chain analysis [C] // Proceedings of the 1st conference on Parallel Problem Solving from Nature. Berlin: Springer Ver-lag, 1991:4-12.
- [8] KRISHNAKUMAR K. Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization [J]. SPIE: Intelligent Control and Adaptive Systems, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Philadelphia, 1989, 1196:289-296.
- [9] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading [M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [10] 吴相豪,吴中如.混凝土热力学参数反分析模型[J].水力发电,2001(2):20-22.

Back Analysis for Thermal Parameters of Concrete Dam with Micro Genetic Algorithm and Finite Element Method

LIU Yin-fang^{1,2}, CHEN Guo-rong², YOU Guo-ying¹, JIANG Chao³

(1 Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSIC, Wuxi 214151, China; 2 Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The thermal parameters are obtained, which have great influence on computation of temperature field of concrete dam. Usually the parameters are obtained from test or empirical formula. Because thermal character of concrete and external environment's complexity and the experimental limitation, it is very difficult to obtain a more precise parameters. In order to solve the problem, in this paper, by using micro-genetic algorithm in back analysis of the thermal parameters of concrete dam, together with finite element solution theory for three-dimensional transient temperature field, we worked out a back analysis program for three-dimensional transient temperature field with micro-genetic algorithm, and engineering examples are given. Result shows that micro-genetic algorithm to reduce the computation than SGA, and to restart makes the population have and ideal diversity, which to avoid the premature phenomenon.

Key words: concrete; thermal parameter; back analysis; genetic algorithm