

粒子群算法和 ADINA 在土石坝参数反演中的联合应用

赵 迪¹ 张宗亮² 陈建生³

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对土石坝的反馈分析问题, 采用 Fortran 语言编程, 实现了粒子群优化算法与商业有限元软件 ADINA 之间的无缝连接, 使整个计算过程自动化; 应用 OpenMP 方式同时调用多个 ADINA 求解器, 启用多核处理器进行并行计算, 提高了计算效率。以糯扎渡超高心墙堆石坝为例, 对粗堆石料 I 区材料应用不同种群规模粒子群进行参数反分析, 结果表明, 将粒子群算法与 ADINA 联合应用于土石坝参数反演是可行的, 并行算法也具有明显的优越性。

关键词 土石坝; 粒子群优化算法; ADINA; 有限元分析

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2012)03-0043-05

A combined application of particle swarm optimization algorithm and ADINA for parametric inversion of earth-rock dams//ZHAO Di¹, ZHANG Zong-liang², CHEN Jian-sheng³(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Hydrochina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Focusing on the problem of the feedback analysis for earth-rock dams, the present study realizes a seamless connection between the particle swarm optimization algorithm and the large commercial finite element software ADINA with the FORTRAN programming, and developed an automated calculation process. The computation efficiency is improved by applying the OpenMP mode for calling the ADINA and invoking multiprocessor computers to achieve parallel computing. By taking the super high core rock-fill dam of the Nuozhadu hydropower station as an example, the parametric inversion was conducted for the data analysis of coarse rockfill materials of Zone 1 with different population sizes. The results indicate that the combined application of particle swarm optimization algorithm and ADINA for the parametric inversion of earth-rock dams is feasible, and the parallel algorithm has obvious advantages.

Key words: earth-rock dams; particle swarm optimization algorithm; ADINA; finite element analysis

土石坝具有就地取材、造价低廉、对地质条件要求较低、抗震性能优越等许多优点, 其建造数量一直居于首位^[1], 但发生溃坝事件的坝型有 98% 以上是土石坝。随着高坝大库的日益增多, 以及因大坝运行时间延长而导致工程的日益老化, 大坝安全问题已引起了人们的普遍关注。用于土石坝应力应变预测计算的堆石料的计算参数, 通常是通过试验法、专家经验法和工程类比法等方法确定的^[2], 但由于勘测、设计、施工碾压及试验方法等诸多因素的影响, 试验法往往很难得出切实符合实际情况的材料参数, 而专家经验法和工程类比法又包含了过多主观因素。

1972 年, Kavangh 等^[3]提出了反算固体弹性模量的有限元法, 经过国内外学者不断的努力形成了一系列的反演分析方法。20 世纪 50 年代中期, 受

生物界生物进化机理的启发, 人们提出了许多用于解决复杂问题的人工智能算法, 如粒子群优化算法、遗传算法、人工神经网络、蚁群算法等。与其他算法比较, 粒子群优化算法概念简单, 需要调节的参数较少, 同时又有深刻的智能背景, 既适合科学研究, 又特别适合工程应用。因此本文选取了粒子群优化算法进行土石坝参数反演, 有限元软件选用具有非线性求解功能的商业有限元软件 ADINA。应用 Fortran 语言将优化方法与有限元软件相互结合, 实现整个反演计算过程的自动化, 依托糯扎渡超高心墙堆石坝工程对算法的可行性与准确性进行论证。

1 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization,

PSO^[4]是基于群集智能理论提出的一种全局优化算法。该算法是受鸟群等群体运动行为方式启发而得到的,通过群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索。

1.1 标准粒子群优化算法

PSO中每个 D 维空间的点——粒子,就代表了优化问题的潜在解,它与粒子飞行速度密切相关,每个粒子的飞行速度都是根据自身和群体的飞行经验来动态调整其大小及方向的,从而向最优解靠近^[5]。标准粒子群算法的过程如图1所示。

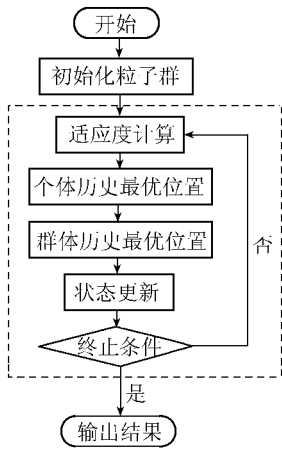


图1 粒子群优化算法流程

第1步:启动粒子群算法。

第2步:初始化粒子群。在给定的参数范围内随机生成 N 个 D 维向量 X_i , $X_i=(X_{i1},X_{i2},\dots,X_{iD})$ ($i=1,2,\dots,N$), N 为种群规模,一般取 $N=20$ ^[6]。 D 维度为计算目标的个数,在土石坝反演计算中, D 为需要反演的参数个数。

第3步:适应度计算。计算每一个 D 维向量的适应度。土石坝反演问题中,适应度可选取测点位移差总和。

第4步:判断个体最优历史位置 P_{best} 。比较粒子适应度与它的个体最优值 P_{best} ,如果优于 P_{best} ,则将 P_{best} 设置为当前粒子位置。在土石坝反演问题中 P_{best} 是使得测点位移差总和最小的位置。

第5步:判断群体最优历史位置 G_{best} 。比较整个粒子群中每一个个体最优历史位置对应的适应度,适应度最好的个体最优历史位置就是群体全体最优值 G_{best} 。

第6步:状态更新。分别根据式(1)和式(2)对粒子的速度及位置进行更新。

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + C_1 r_1 (P_{id}(t) - X_{id}(t)) + C_2 r_2 (P_{gd}(t) - X_{id}(t)) \quad (1)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2)$$

式中: v_{id} 为粒子速度; X_{id} 为粒子位置; P_{id} 为个体最

优历史位置; P_{gd} 为群体最优历史位置; ω 为惯性权重,Shi等^[7]指出采用权重值线性递减的PSO算法,其范围一般取 $0.9 \sim 1.2$; C_1, C_2 为学习因子,一般取 $C_1 = C_2 = 2$; r_1, r_2 为0到1之间均匀分布的随机函数; t 为迭代次数。

第7步:终止条件。算法不可能无限制的循环,终止条件一是迭代次数超过最大迭代次数,二是满足自定义精度。如果满足这两个终止条件之一,算法终止,否则,回到第三步继续进行迭代,直到满足终止条件为止。

1.2 单群体自适应微粒群算法

微粒群算法自从被提出以来,其能否收敛到全局最优解一直是研究者关注的焦点。标准的微粒群算法收敛速度快,但容易在迭代初期就陷入局部极小值。为了解决这个问题,研究者提出了很多改进的微粒群算法。对于土石坝参数反演分析来说,若将每个测点的绝对值差值分别看做目标函数,该反演问题可以看作一个多目标优化问题。基于多目标问题改进的微粒群算法有很多,由于单群体自适应微粒群算法^[8,9]在土石坝反演方面应用较多,且较为成熟,本文选取单群体自适应微粒群算法为优化方法。

单群体自适应微粒群算法与标准微粒群算法的最大区别就在于对速度的更新不使用式(1)而采用式(3)进行计算。

$$V_{id}(t+1) = \omega V_{id}(t) + \varphi (P_{id}(t) - X_{id}(t)) \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad P_{id}(t) = \frac{\varphi_1 P_{id}(t) + \varphi_2 P_{gd}(t)}{\varphi} \quad (4)$$

$$\omega = \begin{cases} \varphi + 1.1 & t < a_1 \\ \varphi - \varphi^{0.5} + 1.0 & a_1 < t < a_2 \\ \varphi - 2\varphi^{0.5} + 0.9 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$; $\varphi_1 = C_1 r_1$, $\varphi_2 = C_2 r_2$, $C_1 = C_2 = 2.05$; a_1, a_2 (且 $a_1 < a_2$)为某一迭代次数,应根据实际问题和种群规模而定。

2 ADINA简介

ADINA(automatic dynamic incremental nonlinear analysis)^[9]在分析计算岩土结构的变形和稳定性方面具有很强的优势,本文采用ADINA进行有限元计算。

应用ADINA对工程分析的过程可以被概括为以下3个基本步骤:①使用ADINA-AUI前处理模块定义有限元模型,包括建立几何模型、生成网格、材料属性赋值、设置边界条件、施加荷载等;②生成求解*.dat文件,启动相应的求解器或求解器组合对模型进行数值计算;③最后应用ADINA-PLOT进行计算结果的后处理,包括列表、彩色云图、包络线、动

画等方式。

3 粒子群算法与 ADINA 的无缝连接

3.1 Fortran 语言编程

要实现粒子群算法与 ADINA 之间的无缝连接,使整个计算过程自动化,就必须应用 Fortran 调用 ADINA 进行计算并能够读取相应的计算结果。应用 Fortran 只能直接打开 ADINA-AUI 用户操作界面,不能直接调用 ADINA 得出需要的结果。ADINA 可以用批处理方式启动,因此可采用 Fortran 调用批处理 *.bat 文件的方式来调用 ADINA 进行计算。

以 ADINA8.5 为例,必须将 *.in 文件和 *.plo 文件拷贝到 ADINA 程序安装目录下(假设安装在 d 盘)批处理 *.bat 文件的写法如下:

```
@echo off
cd d:\ADINA85\ x32 \
aui -b -m 500m *.in
adina -b -s -m 100m -M 800m -t 4 *.dat
aui -b -m 500m *.plo
```

第 1 行是关闭所有回显命令。第 2 行是打开 ADINA 程序安装目录。第 3 行是启用 AUI 用户界面,分配 500 M 内存,且读入 *.in 命令流输入文件。需要注意的是,在 *.in 文件里已经编写了生成 *.dat 的命令流语句:adina optimize = slover file = 'd:\adina85\ x32 \ *.dat'。第 4 行是启动求解器,并分配 800 M 内存给求解器,用第三行生成的 *.dat 文件进行求解。第 5 行为启动 AUI 界面,并且读入后处理命令流 *.plo 文件,在 *.plo 文件里,定义了需要打开的结果文件、对结果文件输出的设置、建立 ZONE、光顺效果以及将结果文件保存到指定目录下 *.txt 文件里。这就实现了用批处理方式运行 ADINA→生成求解文件→进行求解→将需要结果输出的整个过程。

Fortran 调用 d:\adina85\ x32 \ 目录下批处理 *.bat 文件的方法如下:

```
use DFLIB
LOGICAL(4) result
result = SYSTEMqq('d:\adina85\ x32 \ *.bat')
```

Fortran 可以很方便地读取 txt 文档,因此,使用 open 以及 read 语句就可以方便地将所需要的结果读取。在土石坝反演中,需要读取的一般为位移结果,根据输出文件对 read 语句格式进行定义即可。

3.2 流程控制与多核并行计算

由第 1 节知,粒子群算法概念简单,可以根据图 1 所示的流程来进行编程控制。对于土石坝参数反演分析,需要不断地优化材料参数,再将新的材料

参数输入到模型中去计算。在整个流程中, Fortran 将生成的一组材料参数按照 ADINA 对材料的定义格式编写生成 material.in 文件,而 material.in 是通过在模型命令流文件 *.in 中编写命令 read file = 'd:\adina85\ x32 \ material.in' 读入的。

实现粒子群算法和 ADINA 之间无缝连接减少了手动计算的工作量,在一定程度上减少了计算时间。如果调用 ADINA 计算一组材料的时间是 3 h,按照单一流程,假若选用 10 个粒子迭代 10 次可以得到符合监测资料的较好解,反演一种材料需要的时间一共是 3 h × 10 × 10 = 300 h,也就是十几天才能反演一种材料,反演心墙堆石坝的粗堆石料和心墙两种材料就需要二十几天,计算的时间成本太高,使其可行性受到质疑。随着计算机技术水平的不断提高,多核计算机越来越普遍地应用于数值计算。如果可以进行并行计算,假设同时调用 5 个 ADINA 进行计算,那么反演一种材料的时间就大约可减少 80%,也就是 60 h,反演两种材料耗时为 120 h,大约 5 d,这就大大节省了计算的时间成本。在 Fortran 中可以使用 OpenMP^[11]实现并行计算过程。

OpenMP 诞生于 1979 年,是用于共享内存并行系统的多线程程序设计的一套指导性注释。OpenMP 支持的编程语言包括 C 语言、C++ 和 Fortran 等;而支持 OpenMP 的编译器包括 Sun Compiler, GNU Compiler 和 Intel Compiler 等。

使用 OpenMP 首先要明确以下几点:①使用的计算机是双核以上的;②计算机系统是 64 位的;③所用的 IVF 有 64 位组件;④在 IVF 中需配置参数 project > properties > fortran > language > process openMP Directives > generate parallel code(Qopenmp);⑤程序可以并行,即程序中有可以并行的地方,前后没有逻辑关系。

4 程序验证

以位于云南省普洱市和澜沧县交界的澜沧江中下游河段的糯扎渡超高心墙堆石坝为例对程序进行验证,该坝在已建、在建的同类坝型中居世界第 4,最大坝高 261.5 m^[12]。大坝最大横断面材料分区如图 2 所示,二维网格见图 3,共 1696 个节点,834 个单元。

选取粗堆石料 I 区材料进行参数反演分析,根据文献 8]及[13]中对于邓肯张 E-B 模型的敏感性分析结果,选取敏感度较高的 K_n , K_b , m 4 个参数作为待反演参数,各参数取值范围见表 1。假定设计值对应的节点数值计算结果为监测位移,以第 27 个施工级为例,选取位于下游粗堆石 I 区的 1471, 1473, 1475 这 3 个节点作为监测节点进行参数反演,结果见表 1。

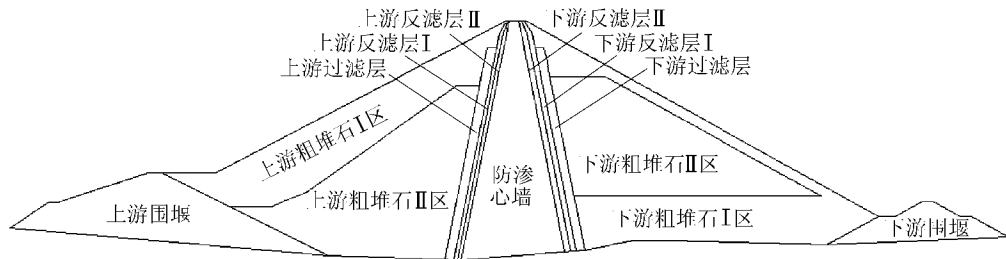


图2 糯扎渡大坝最大横断面材料分区

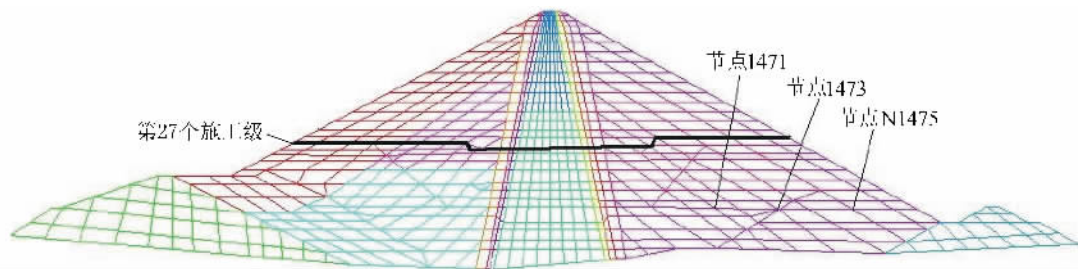


图3 糯扎渡大坝二维网格示意图

表1 各参数取值范围

参 数	K	n	K_b	m
最小值	1 100	0.100	350.0	0.000
最大值	1 900	0.400	1 000.0	0.250
算法收敛最大迭代速度	40	0.015	32.5	0.015

4.1 不同种群规模对算法的影响

为了反映不同种群规模对粒子群算法的影响,分别选取种群规模 $N = 10, 15, 20, 25$ 的粒子群对粗堆石料 I 区材料进行参数反演,反演结果对比见表 2,对收敛速度见图 4。

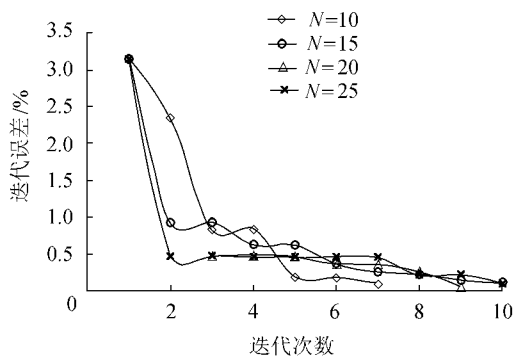


图4 种群规模对收敛速度的影响

由表 2 可见,反演结果可以达到很高的精度,反演结果真实可靠。图 4 正好说明了粒子群优化算法

收敛速度快、收敛性高的特点,也验证了 Shi 等^[14]认为“PSO 对种群大小不敏感”的观点。在第 3 次迭代以后,误差就能够达到 1% 以内,而且种群规模越大,互相协调搜索的粒子越多,就越能发挥粒子群优化算法的搜索能力。用户可以根据实际优化问题调节种群规模大小,以达到既能保证算法结果真实可靠,又能在较短的时间内完成搜索、减小时间成本的目的。

4.2 并行算法的优越性

对于粒子种群规模 $N = 15$ 情况进行单一流程计算耗时约为 27 min,采用 3 个 CPU 同时进行计算,计算耗时约为 13 min,节省了一半时间。由于是二维情况下进行计算,单个计算的时间比较短,有很大比例的时间都是消耗在 Fortran 运行生成粒子群、更新状态、读写文件等上面,如果进行单一计算耗时大,计算机有多个 CPU 的三维计算时,使用并行方法进行计算是非常必要和具有优越性的。

5 结 语

由算例计算结果可知,将粒子群算法与 ADINA 联合应用于土石坝参数反演,是切实可行的。粒子群算法收敛速度较快,搜索结果准确,并行的方法可以大大提高效率,尤其在三维情况下,单元数目庞

表2 不同种群规模反演结果对比

种群规模	K	n	K_b	m	沉降/mm		
					节点 1471	节点 1473	节点 1475
10	1 547.127	0.229	672.619	0.104	705.338	493.197	320.008
15	1 433.719	0.260	708.957	0.074	706.452	492.859	320.931
20	1 384.366	0.278	720.000	0.065	705.098	492.135	321.262
25	1 434.238	0.261	716.529	0.068	705.246	491.623	319.866
试验参数	1 491	0.241	683	0.101	705.290	492.409	320.680

注:试验参数为大型固结不排水三轴试验的试验参数。

大,单一计算耗时大,计算机有多个 CPU 时,使用并行方法进行计算是非常必要和具有优越性的。

参考文献：

[1] 汝乃华,牛运光.大坝事故与安全[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

[2] 袁会娜.基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析[D].北京:清华大学,2003.

[3] KAVANGH K T,CLOUGH R W. Finite element application in the characterization of elastic solid[J]. Int J Solids Structures , 1973(7) :11-23.

[4] KENNEDY J ,EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proc IEEE International Conference on Neural Networks IV .Piscataway ,NJ : IEEE Service Center ,1995 :1942-1948.

[5] SHI Y ,EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Alaska : Anchorage ,1998 :69-73.

[6] 刘建华.粒子群算法的基本理论及其改进研究[D].长沙:中南大学,2009.

[7] SHI Y ,EBERHART R. Empirical study of particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 1999 Congress on

Evolutionary Computation. Piscataway , NJ : IEEE Service Center ,1999 :1948-1950.

[8] 曾建潮,崔志华.微粒群算法的统一模型及分析[J].计算机研究与发展,2006,43(1):96-100.

[9] 杜好.基于微粒群算法的堆石坝坝料参数反演分析[D].大连:大连理工大学,2006.

[10] 岳戈,陈权. ADINA 应用基础与实例详解[M].北京:人民交通出版社,2008.

[11] HERMANN S M. Parallel programming in Fortran 95 Using OpenMP[M]. Madrid : School of Aeronautical Engineering. 2002.

[12] 赵川,刘盛乾,李锡林,等.糯扎渡水电站粘土心墙压实度检测方法与控制标准[J].云南水力发电,2009,25(5):58-61.

[13] 牟声远,王正中.堆石料邓肯张模型的参数敏感性与统计分析[J].中国农村水利水电,2009(3):97-100.

[14] SHI Y ,EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway ,NJ : IEEE Press ,1998 :69-73.

(收稿日期 2011-09-19 编辑:周红梅)

(上接第 38 页)

[5] AL-HOMOUD A S ,TANASH N. Modeling uncertainty in stability analysis for design of embankment dams on difficult foundation[J]. Engineering Geology ,2004 ,71(3) :323-342.

[6] SL319—2005 混凝土重力坝设计规范[S].

[7] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].

[8] EM1110-2-2200 Engineering and design gravity dam design [S]. Washington D. C. :Department of the Army ,US Army Corps of Engineers ,1995.

[9] 陈祖煜.土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003:67-82.

[10] 周建平,钮新强,贾金生.重力坝设计二十年[M].北京:中国水利水电出版社,2008:319-328.

[11] 黄东军,聂广明.重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考[J].水力发电学报,2005,24(2):90-93.

[12] 孙冠华,郑宏,童伟.重力坝双滑面抗滑稳定分析中抗力角的取值建议[J].水力发电学报,2011,30(3):164-168.

[13] 苑举卫,杜成斌,洪永文.厂坝联合作用下重力坝厂房坝段静动抗滑稳定分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(2):229-233.

[14] SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S].

[15] 合肥工业大学,四川省水利水电勘测设计研究院.武都水库大坝 18# 坝段深层抗滑稳定性分析研究报告[R].合肥:合肥工业大学,2006.

[16] 四川武都引水第二期工程武都水库技施设计阶段大坝深层抗滑稳定设计报告[R].成都:水利部,四川省水利水电勘测设计研究院,2006.

[17] 朱大勇,李焯芬,黄茂松,等.对三种著名边坡稳定性计算方法的改进[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):183-194.

[18] ZHU Da-yong ,LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,2002 ,26(15) :1573-1590.

[19] 朱大勇,卢坤林,台佳佳,等.基于数值应力场的极限平衡法及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1969-1975.

[20] 范鹏贤,朱大勇,郭志昆,等.动态规划法求解边坡安全系数最小上解[J].岩土工程学报,2007,29(3):467-470.

(收稿日期 2011-11-21 编辑:熊水斌)

