

数值模拟软件 FLAC 及其在地学应用简介

谢建华^{1,2}, 夏 斌¹, 徐振华³, 张宴华⁴

(1. 中科院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 仲恺农业技术学院, 广州 520225; 4. CSIRO Exploration & Mining, PO Box 1130, WA6102, Australia)

[摘 要] 拉格朗日元法是一种常见的数值计算方法, 以有限差分程序 FLAC 软件为例, 简单论述其原理, 分析了它的优缺点并叙述其工作流程, 表明其非常适合解决非线性、大变形问题。同时通过介绍了在国内外地学方面的一些应用实例, 对数值模拟技术在国内地学方面的应用和研究提出一些建议。

[关键词] 数值模拟 有限差分法 FLAC 地学

[中图分类号] P628 [文献标识码] A [文章编号] 0495 - 5331 (2005) 02 - 0077 - 04

数值模拟技术就是以计算机软件进行数值分析的一种方法。它借助计算机、数学、力学等学科的知识, 为工程分析、设计和科学研究服务, 已广泛应用到地震、探矿找矿、防灾减灾等地质工程和科学研究的众多领域^[1-5]。

1 FLAC 软件原理概述

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), 即连续介质快速拉格朗日分析, 它是一种基于拉格朗日差分法的一种显式有限差分程序, 是由美国 Itasca Consulting Group, Inc. 开发的商业软件。

FLAC 基于显式差分法来求解运动方程和动力学方程。在确定研究区域的几何形状后, 首先将该区域进行离散化处理, 将之划分为若干个网格单元, 各网格单元之间通过节点连接, 当某个节点受到荷载作用后, 由节点的应力和外力变化以及时间步长, 利用虚功原理求得节点的不平衡力, 然后将不平衡力重新作用在节点上, 进行下一步迭代过程, 直到不平衡力足够小或节点位移趋于平衡为止。具体如图 1 所示:

2 软件优、缺点

它与现行的数值方法相比有着明显的优点^[6]:

1) FLAC 计算中使用了“混合离散化”(mixed discretization)技术, 更为精确和有效地模拟计算材料的塑性破坏和塑性流动。这种处理方法在力学上比常规有限元的数值积分更为合理。

2) 采用全动态分析方法获取模型运动方程的

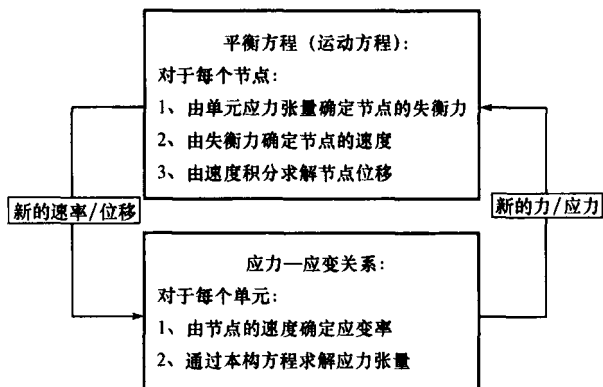


图 1 FLAC 求解过程流程图
时间步长解, 即使在模拟静态问题时也是如此。因此, 它可以较好地模拟系统的力学不平衡到平衡的全过程, 从而可追踪介质动态演化的全过程, 深入探讨其时间效应与空间效应。

3) 求解中采用“显式”差分方法, 在求解非线性应力-应变关系时, 这种方法不需要存储任何矩阵及对任何刚度矩阵进行修改, 既节约了计算机的内存空间, 又减少了运算时间, 因而提高了解决问题的速度, 便于实现非线性大变形问题的求解。

4) FLAC 内置有多个力学模型, 从而可以进行众多类型材料变形的力学模拟。如摩尔-库仑模型、应变硬化-软化模型 (代表非线性、不可逆剪切破裂与压塑)、界面模拟 (界面为平面, 允许沿界面滑动或分开, 用来模拟断层、节理和摩擦边界)、热力模型 (模拟材料中的瞬态热流、热应力的发生以及进行热与力的耦合计算等) 等, 用以模拟非线性、

[收稿日期] 2004 - 03 - 17; [修订日期] 2004 - 05 - 13; [责任编辑] 徐大良。

[基金项目] 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2 - 101)。

[第一作者简介] 谢建华 (1978 年 -), 男, 2003 年毕业于中南大学, 获硕士学位, 在读博士生, 现主要从事研究方向为数值模拟工作。

不可拟等地质材料的变形特征。同时用户还可以使用 FLAC 自带 FISH 编程语言来创建自己定制模型。

5) FLAC 软件采用了宏语言 FLACish (简称为 FISH), 因此用户可以自定义变量、函数及本构模型, 并可以直接在 FLAC 软件中试验其模型, 也可以设计新的程序。从而增强了 FLAC 软件的灵活性, 用户可以对 FLAC 软件进行有效扩展, 建立一些特殊计算模型, 以便解决一些复杂的实际问题。

6) FLAC 还具有绘图功能, 通过其重复占位程序, 用户能绘制各种图形和表格, 其计算时步函数关系曲线的绘制特别有助于分析何时到达平衡与破裂状态, 并在瞬态计算或动态计算中进行量化监控, 通过图形可以非常直观进行各种分析。

7) FLAC 按行与列的形式进行单元编号, 这对于某些指定单元的研究很方便。三维快速拉格朗日分析将计算区域划分为若干个 6 面体单元, 每个单元应力在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性的本构关系, 若单元应力使得材料屈服或产生塑性流动, 则单元网格可以随着材料的变形而变形。

当然, FLAC 软件也有不足之处:

1) 对一些复杂的地学模型的建立仍然十分困难。毕竟在实际地质工程工作中存在许多的复杂、特殊力学问题, 一个软件不能也不能将所有的地学问题都考虑到。因此, 对于一些复杂、特殊的模型的建立, 需要借助其他工具或采用 FLAC 内嵌宏语言进行二次开发。

2) 虽然, FLAC 软件自带有内嵌程序语言 (FISH), 但其采用的是键入数据/命令行的方式, 同时, 其独特的编程方式, 但对于大多数工程人员来说, 要掌握它是非常困难的。

3) 在创建一些复杂的地质体模型时, 存在着操作费时、不便, 而且工程人员要花大量的时间用于数据的准备操作, 从而影响了模型建立的周期、难度和效率。

目前, 一些数值模拟方面的专家对这些方面进行了卓有成效的研究, 极大地克服了该软件的不足。胡斌等 (2001 年)^[7]利用 Fortran 语言编写了 FLAC^{3D} 的前处理程序, 可以用来解决一些实际复杂工程问题, 更加准确地反映地质地形条件, 更加方便快捷地建立复杂 FLAC^{3D} 计算模型, 实现对 FLAC^{3D} 的功能扩展; 侯恩科等 (2001 年)^[8]提出利用三维地形模型与数值模拟的耦合来简化复杂数值模拟前处理思路, 并以具体的三维地学模拟软件 microl YNX 与数值模拟软件 RFPA 和 FLAC 的耦合为例, 提出了耦合的具体模式和方法, 开发出数据转换程序, 利

用该转换程序不但可以将 microl YNX 构建的任意复杂程度的二维和三维地质模型数据转换成 RFPA 和 FLAC 所能接受的数据文件, 而且还可以根据模拟需要方便地修改地质体的力学参数和边界条件等数据。同时, 此耦合方法具有普遍的适用性, 可以适用于其他三维地学模拟和数值模拟系统的耦合, 从而极大地简化了数值模拟的前处理, 拓宽了三维地学模拟的应用领域。

3 工作流程

FLAC 工作的具体流程如下^[6,9]:

1) 建立 FLAC 应变模型。包括产生网格, 根据要求的形状变形, 指定边界条件和初始条件, 定义本构模型和材料特性等。

2) 确定模型平衡状态。在给定的边界条件和初始条件作用下, 模型应处于初始平衡状态, 通过对最大不平衡力, 节点速度以及位移的监测, 用户需要确定模型在何种情况下达到平衡状态。

3) 检查模型的反应。FLAC 模型的反应是通过其显式动态代码进行监控的。当模型动能降到可以忽略值或允许范围之内时, 可以认为模型处于力的平移状态或稳流状态。否则, 就要返回步骤 1), 对模型进行重新设置。

4) 执行改造, 改变设置条件。在求解过程中, FLAC 允许改变模型的条件, 包括对任何节点的载荷或应力的增加和删减, 也允许节点的约束和解除约束, 以及对任何材料特性的改变, 从而实现对模型进行改善。

5) 求解 FLAC 模型。FLAC 是采用显式时间逼近法来求解代数方程组, 求解过程的时步是由 FLAC 代码进行自动控制, 因此, 用户只需在认为结果到达满足时, 即可结束求解过程。

6) 实施附加改变。就是对模型做进一步的改善, 确定是否需要对一些参数进行研究, 若需要, 则可返回到步骤 1) 或 4) 重新设置进行, 否则, 即可得到结果。

7) 获得结果, 并对结果进行解释。最好将结果直接以图形的形式展示, 并且这个图形产物的格式能够同现场测量和观察直接进行对比, 同时模型中的任何变量的参数值都能够很容易地通过模拟器获得更多的详细解释。

4 国内、外地质应用实例

4.1 利用约束卡迪兹海湾对泥火山及其流量进行数值模拟^[10]

泥火山分布在大陆和海底环境 50cm 到 800m

深的范围,它们的高度和形状的变化影响了形成它们的驱动力和物质的物理性质。作用在泥火山构造后面的驱动力来自于处在沉积柱深度的流态泥浆的超压力,尽管超压力的很多成分来自一个泥浆池中通过粘土矿物脱水和区域构造压力形成的不稳定产物,但是一个主要参数是沉积柱的厚度。因此,很大程度上泥火山理论上能达到的最大高度是流态泥浆和它的沉积覆盖层之间的密度对比以及泥浆源深度的函数;通过泥浆和沉积物之间的均衡补偿模型,可以预测出泥火山下面的流态泥浆池的深度,因此,一旦火山爆发,就可以预测到泥浆流动的一般行为。利用一个粘性-重力流量模型来描述单个泥浆流动的爆发,提出了一个包括多个层理辐射流的圆锥形泥火山,这个模型证明泥浆流的厚度、爆发率和速度很大程度上依赖流态泥浆的粘性、密度和超压力。该模型还被用来论证对卡迪兹海湾和摩洛哥边缘海底泥火山的观测资料,应用该模型对两个设计好的泥火山进行研究,得到大量的流量率、流量速度、爆发持续周期、高度和管道半径等估计值,从而计算出流态泥浆角砾岩平均动粘滞率和密度,并且可以计算出不同深度之间的流动速度。通过研究,若要在深度达 250m 形成类似于卡迪兹海湾的两个被研究的圆锥形泥火山,预测出总量达 234 个流量至少维持 117 天的爆发活动。

4.2 青海省乌兰县托莫尔日特金矿区构造应力场与流体运移势的计算机数值模拟^[11]

托莫尔日特金矿区位于柴达木盆地东北缘,哇洪山断裂北中段西侧,区内岩浆活动频繁,断裂构造发育,具有较好的成矿地质构造背景。

矿区内出露的地层主要是滩间山群及少量第四系,滩间山群为一套绿片岩相(局部为角闪岩相)的变质岩,其岩性主要为变质凝灰岩、安山岩、绿片岩、斜长角闪片岩,局部夹有大理岩、云母石英片岩等,在矿区西部广泛分布,第四系主要分布于沟谷地区,以冲积和洪积砂砾及风积粘土为主。矿区岩浆活动频繁,以加里东期及印支期为主,岩浆岩在矿区广泛分布,矿区构造以断裂为主,在矿区及其外围断裂构造均十分发育。

张拴宏等人运用有限元数值模型,对托莫尔日特地区成矿初期及主成矿期构造应力场及流体运移势进行了二维计算机模拟。模拟结果显示 NW - NWW 向断裂构造带对本区构造应力场的控制是十分明显的。在该断裂带穿过的乌达热乎、赛坝沟成矿带及其北部、石棉沟西部地区,是强烈的应力梯度带、高剪应力带、高应变能密度带及低流体运移势分布区,反映了这些地区构造环境优越,且是流体运移

的有利渗流区。

4.3 南海形成演化及其动力学数值模拟

南海位于欧亚板块、太平洋板块以及印度洋-澳大利亚板块三者的交汇处,面积达 $350 \times 10^4 \text{ km}^2$,是西太平洋边缘最大的海盆,由于南海具有丰富的油气资源以及其独特的构造发育模式、复杂的演化过程,吸引了众多国内外地质、地球物理学家的关注和研究。前人的研究结果表明,南海的成因非常复杂。有些将之解释为扩张形成,而且有不同的扩张模式,如多次海底扩张(何廉声,1988;姚伯初,1996等)、多中心微型扩张(李卢玲,1985等)等,扩张时间不一,但较统一的是认为受太平洋板块向欧亚大陆俯冲,以及印度板块与欧亚板块发生碰撞这双重作用所制约的;也有将南海成因认为是地幔上蚀(谢继哲,1982;黄福林,1986等),认为南海是在“南海地台”上发展而成的,其成因机制为地幔上拱,地台裂隙,陆壳下沉导热的上地幔中,地幔熔融物取代原来的陆壳形成新的洋壳。

为了真实全面地了解和南海的成因,运用 FLAC 数值模拟软件,建立了南海的平面动力学数值模拟模型,并考虑了两种方案,即(1)只单独考虑印度板块与欧亚板块发生碰撞,而不考虑太平洋板块对欧亚大陆的俯冲作用,目的在于同 Tapponnier (1982)^[12]等提出的试验模式做对比,和方案(2)在考虑印度板块与欧亚板块发生碰撞的同时,还考虑了太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用这两种模式,来分析南海地区动力学应力场矢量的分布及其南北、东西方向的位移矢量,结果分析表明,在这两种模式下,均能产生南海地区的南北向扩张;同时,我们还对南海地区进行了剖面模型的数值模拟,设计了 3 种方案:(1)只考虑拉张(6Ma 拉张 20%);(2)只考虑软流圈上涌(在 6Ma);(3)在 6Ma,同时考虑 20% 的构造拉张和软流圈上涌。模拟结果表明纯南北向拉张不足以导致南海的打开,纯软流圈的上涌能引起很大的岩石圈减薄,但不能产生足够的地壳减薄,而在同时考虑两者时,能有效地引起岩石圈和地壳的减薄,极有可能导致南海的打开。综合平面模型和剖面模型两方面的模拟结果,我们认为,南海的打开成因是印度板块与欧亚板块的碰撞和太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用,以及地幔柱上涌三者共同作用的结果,并三者在不同时期起不同的主导制约作用。该成果将另文发表。

5 结 语

在国外,数值模拟技术得到广泛的应用,而我国

80年代末才将 FLAC应用于岩土工程地质力学分析,在地质学方面的应用已进入快速发展阶段(王岳军等(2001)^[13]模拟了湖南印支期过铝质富钾花岗岩形成和基性岩浆底侵以及地壳加厚热效应的工作);尹光志等(2001)^[14]利用实验室相似模型试验和有限差分程序 FLAC,对南桐煤矿二井三区煤层开采引起的岩体移动、矿山压力分布和地表沉降的基本规律进行研究,对现场开采及灾害预测和防治均起到指导作用;席先武等(2003)^[15]利用 FLAC软件,再现了湖南中生代岩石圈构造体制由挤压转换为伸展减薄过程中,区域构造应力和地温场的可能的演化历程,探讨了其耦合成矿效应和深部动力学制约。

数值模拟技术在地学方面的应用,使得原先只能做定性研究的问题进行定量化研究了,并可实现各种不同空间尺度上的模拟,如小至劈理、节理发育形成过程大到岩石圈尺度甚至全球性的地球动力学分析,为地质学家解决诸多地学难题提供强有力的方法和手段。目前国内一些地质学家提出许多区域大地构造演化的动力学模型,如青藏高原碰撞挤压及其隆升、大别-苏鲁造山带的深俯冲作用及碰撞后下地壳拆沉作用等,但是由于这些模型缺乏对力学机制和动力学过程的定量模拟,使得无法进行更深入的研究。因此,如果在合理构建地质模型的基础上,利用数值模拟方法,定量模拟其热、流动、力学和动力学过程,探讨、验证岩石圈内部热动力驱动、流体运移、应力演变与构造变形的递进、叠加与耦合效应,并将构造地质-地球物理-地球化学方面的资料进行联系对比,从而对各不同区域的大地构造演化获取动力学的定量理解,并将有助于地学研究定量化的发展,将极大地提升国内大地构造学研究的水平。

致谢:非常感谢澳大利亚联邦科学与工业研究组织张宴华教授在南海动力学数值模拟工作中的帮助。

[参考文献]

- [1] 董清华. 工程地震勘探数值模拟研究[J]. 地质与勘探, 2000, 4: 56~59.
- [2] 吴洪词,胡兴,包太. 采场围岩稳定性的 FLAC算法分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 4: 96~98.
- [3] 来兴平,伍永平,蔡美峰. FLAC在地下巷道离层破坏非线性数值模拟中的应用[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(3): 193~195.
- [4] 寇晓东,周维垣,杨若琼,等. 应用三维快速拉格朗日法进行三峡船闸高边坡锚固稳定与机理研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 68~82.
- [5] 杨立强,张中杰,林炯,等. FLAC基本原理及其在地学中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1).
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D}, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, version 2.0, users manual[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [7] 胡斌,张倬元,等. FLAC^{3D}前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1387~1391.
- [8] 侯恩科,等. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388~392.
- [9] 龚纪文,席先武,王岳军,等. 应力与变形的数值模型方法[J]. 华东地质学院学报, 2002, 25(3): 220~227.
- [10] Murton, Bramley, Biggs, Juliet Numerical modelling of mud volcanoes and their flows using constraints from the Gulf of Cadiz[J]. Marine Geology, 195(4): 223~236.
- [11] 张拴宏,周显强,田晓娟,等. 青海省乌兰县托莫尔日特金矿区构造应力场与流体运移势的计算机数值模拟[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 40~45.
- [12] P Tapponnier, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 1982, 10: 611~616.
- [13] 王岳军, Y H Zhang, 范蔚茗,等. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚效应的数值模拟[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(6): 491~499.
- [14] 尹光志,鲜学福,代高飞,等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450~453.
- [15] 席先武,杨立强,王岳军,等. 构造体制转换的温度场效应及其耦合成矿动力学数值模拟[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 47~55.

BRIEF INTRODUCTION OF NUMERICAL SIMULATION SOFTWARE FLAC AND ITS APPLICATION ON GEOSCIENCES

XIE Jian - hua^{1,2}, XIA Bin¹, XU Zhen - hua³, ZHANG Yan - hua⁴

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3. Zhongkai University of Agriculture and Technology, Guangzhou 520225; 4. CSIRO Exploration & Mining, PO Box 1130, Bentley WA6102, Australia)

Abstract: The principle of Lagrangian element method, a common numeric analysis, is briefly discussed. Advantages and shortcomings of the method are discussed using FLAC software, and work flows of the software are also presented. It is shown the method is very suitable to resolve non-linear and large-anamorphic problems. Some geo-scientific applications in home and abroad are presented and some suggestions of technology using numeric simulation in geosciences are also put forward.

Key words: numerical simulation, finite difference method, fast Lagrangian analysis of Continua, geosciences