

使用双核计算机并行求解水文地质参数研究

孔祥龙,朱国荣,江思珉

南京大学水科学系,南京,210093

内容提要:在建立地下水流模型的过程中,模型验证一直是较为复杂的步骤之一,具体难点包括寻优方法的选用,为保持总体平衡所引起的参数峰值异常以及总体寻优需要大量的计算机时等问题。本文运用区域分解法中D—N交替法的基本思想,在计算目标函数值时,将整体求解水文地质模型的过程分解为计算各参数分区内的子模型的过程,并在双核计算机上实现了并行计算。理想算例的计算结果证明了该方法用于水文地质逆问题求解的可行性,它不仅减少了求解过程中所需要的计算机时,而且提高了参数的拟合度。最后将这种方法应用到山东鹏山水源地的水文地质参数求解问题中,由结果可以看出,运用该方法反求水文地质参数是可行的,具有很好的应用前景。

关键词:水文地质参数;逆问题;区域分解法;并行求解;双核计算机

地下水资源是水资源的重要组成部分,是人类社会生存和发展的重要物质条件。对地下水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件作出科学的全面的分析和评估,是合理开发和管理地下水资源的基础,因此,建立有效可行的地下水流数值模型是地下水资源评价的重要工作。

模型验证是地下水数值模拟过程中的一个重要阶段,其主要任务就是识别水文地质参数,这一阶段通常也被称为水文地质逆问题。计算这类问题目前最有效的方法就是有限单元法(FEM)、有限差分法(FDM)等(薛禹群等,1980)。这类计算方法的计算量较大,经常需要经过方程组的求解和迭代。而方程组的求解和迭代中主要的计算量基本都在对系数矩阵求逆的过程中。模型的验证一直需要耗费大量的计算机时,尤其在地下水系统概念提出以后,人们开始研究更加复杂、更加大型的模型,随之而来的就是模型的识别变得更加困难,所用的计算机时急剧增加,已经不能单靠计算机硬件的发展来减少计算用时。为此,人们开始寻求新的办法。已经有人提出了利用并行模拟技术来解决这一问题(王浩然等,2003;王敏等,2005)。本文采用区域分解方法将大区域问题转变成若干个小区域问题,将一个大型复杂求解问题转变为若干个小简单求解问题,并利用双核计算机并行求解,极大地减少了计算用时。

电子计算机的应用以及数学地质方法的引入,

使水文地质工作者从费时繁重的工作中解脱出来,使定量分析错综复杂的地质、水文地质过程成为可能。随着电子计算机向高效率、低成本、分布式发展,计算机模拟应用日益广泛。计算机硬件的发展十分迅速,到目前为止,已经有了双核处理器问世。对于双核计算机在地下水模拟中的应用目前还处于起步阶段。本文主要介绍了基于区域分解方法并行求解水文地质参数的基本思想,以及在双内核计算机上理想算例的实现,最后将这种方法运用到山东鹏山水源地水文地质参数求解问题中。

1 区域分解方法简介

区域分解算法的发展史,最原始的思想可追溯到1870年德国数学家H. A. Schwarz提出的著名的Schwarz交替法。20世纪50年代,有人把Schwarz方法用于计算。近十年来,由于并行计算机以及网络问世并且日益普及,经典的串行计算格局不适应于并行计算机,传统的算法受到挑战,区域分解算法应运而生。

简而言之,区域分解算法是把计算区域 Ω 分解为若干子域,于是把对原问题的求解转化为在子域 Ω_i 上进行求解。区域分解算法特别受关注是因为它具有其他方法无法比拟的优越性,最重要的就是缩小了问题的规模及并行计算,减少了计算用时并不同程度上提高了计算结果精度。根据区域划分的

方法的不同,可以把区域分解法分为重叠型区域分解算法、不重叠区域分解法、虚拟区域法以及多水平方法。本文应用的是不重叠区域分解法(吕涛等,1999)。

2 水文地质参数寻优的并行实现

本文采用从目标函数着手,利用区域分解方法并行求解目标函数。与串行方式相比较,在优化方法上,串行模式与并行模式基本上没有什么区别;而在计算目标函数的过程中,串行模式采用的是地下水模型的整体求解,并行模式采用的是基于区域分解方法的并行求解。从后面理想模型的计算结果中我们可以发现,采用并行模式模型的拟合精度有所提高,而且节约了大量的时间。目标函数的并行求解过程如下:

(1)数据准备阶段:产生单元剖分、参数分区、边界条件和初始条件等相关的结点、单元信息。

(2)划分子域,实质上就是水文地质参数分区,同时设定各子域的初始参数,包括相应子域人工边界上的属性值。

(3)子域模型的求解,并提取出此参数条件下的人工边界属性值。

(4)子域交换边界值,判断是否满足迭代终止条件。如不满足,则重新给定各子域人工边界属性值,重复步骤(3)。如满足,计算目标函数值。

由以上步骤可以看出,在求解目标函数值时,各子域内的计算可以说是基本互不影响的,只是在各子域模型求解后要互相交换一下人工边界上的属性值,因此完全可以将各子模型的求解分配到若干个处理器上,从而实现并行的求解。

3 理想模型在双内核计算机上的应用

为了实现上述的求解思路,本文考虑一个 2000m×1500m 矩形区域的理想的非均质、各向同

表 1 参数优化结果对比

(标准值: $K_{\Omega_1} = 100\text{m/d}$, $K_{\Omega_2} = 120\text{m/d}$)

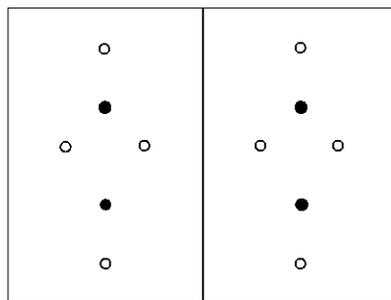
Table 1 Comparison of optimization results

	K 值(m/d)		E 值	运算时间(s)
	Ω_1 区	Ω_2 区		
整体求解(单核)	101.196	119.421	1.10×10^{-3}	14.64
整体求解(双核)	101.196	119.421	1.10×10^{-3}	14.33
区域分解串行求解(双核)	99.634	120.139	2.13×10^{-4}	4.67
区域分解并行求解(双核)	99.634	120.139	2.13×10^{-4}	2.43

性承压水模型,含水层厚度 20m,四周均为定水头边界,初始水头水平展布。该模型由两个参数分区构成,每个分区各设计 2 眼抽水井和 4 个水头参考结点(水头观测孔),图 1 展示了该模型的基本形状。

此问题可用方程为式(1)的数学模型来描述。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, 0) = H_0 \\ H|_{\Gamma_1} = f \end{cases} \quad (1)$$



●—抽水井 pumping well ○—水头参考点 observation port

图 1 研究区示意图

Fig. 1 General view of study area

我们将此模型按照参数分区的形状分解成 2 个子区域,并事先假设两个分区的渗透系数($K_{\Omega_1} = 100 \text{ m/d}$, $K_{\Omega_2} = 120 \text{ m/d}$)和贮水系数($s_{s,\Omega_1} = s_{s,\Omega_2} = 0.0001$),再将计算区域剖分为 600 个单元,将总共 5d 的计算时间离散为 10 个计算时段(每个时段长度 0.5d),正演出各水头参考结点在此参数条件下各时段水头,以之作为反演阶段的拟合水头。

反演阶段将渗透系数作为待定参数,优化问题采用 Hooke—Jeeves 方法(唐焕文等,2001)求解。根据 D—N 交替法的要求,设 Ω_1 区域的人工边界为第一类边界(Dirichlet 边界), Ω_2 区域的人工边界为第二类边界(Neumann 边界)。在求解目标函数值时,子域采用有限单元法进行离散计算。优化过程在双内核计算机上并行实现。

为了有所比较,我们用整体求解的串行计算、基于区域分解方法的串行计算在同一台双核计算机上进行了计算,对比结果如表 1。

由以上的结果可以看出:① 基于区域分解方法的串行求解的计算耗时约为整体求解时间的 30%,时间的减少是由于区域分解方法的采用使得问题(方程)的求解规模减小,

尽管在求解过程中可能增加了方程的求解次数；②对区域分解方法的串行求解方法并行化之后，计算用时又减少了近 50%，这是并行算法的优势所在；③从表 1 可以发现整体求解的方法无法发挥双核计算机的优势，它们耗费的时间很接近；④在并行求解过程中，双核同时工作极大的减少了计算用时；⑤与传统的并行系统相比，双核计算机不需要网络支持，减少了数据交换的时间。

4 应用实例

鹏山水源地位于山东省莱芜市东部的辛庄镇百嘴红村鹏山一带，计算区的含水系统主要包括第四系松散沉积物孔隙含水层和岩溶裂隙含水层（见图

2）。含水层的主要补给来源为降雨入渗、河流渗漏及边界侧向补给。由于裂隙、断层的强烈切割，以及“天窗”的大量存在，两个含水层之间的水力联系十分密切，水位动态基本呈现同步变化的趋势，因此将两个含水层概化为一个统一的含水系统，即接受大气降雨补给的潜水系统。

表 2 区域分解参数寻优结果

Table 2 Results of optimization

分区编号	渗透系数 K_x (m/d)	渗透系数 K_y (m/d)	给水度
I	2.80	1.53	0.024
II	2.79	1.53	0.026
III	9.28	9.49	0.023
IV	2.86	2.04	0.084

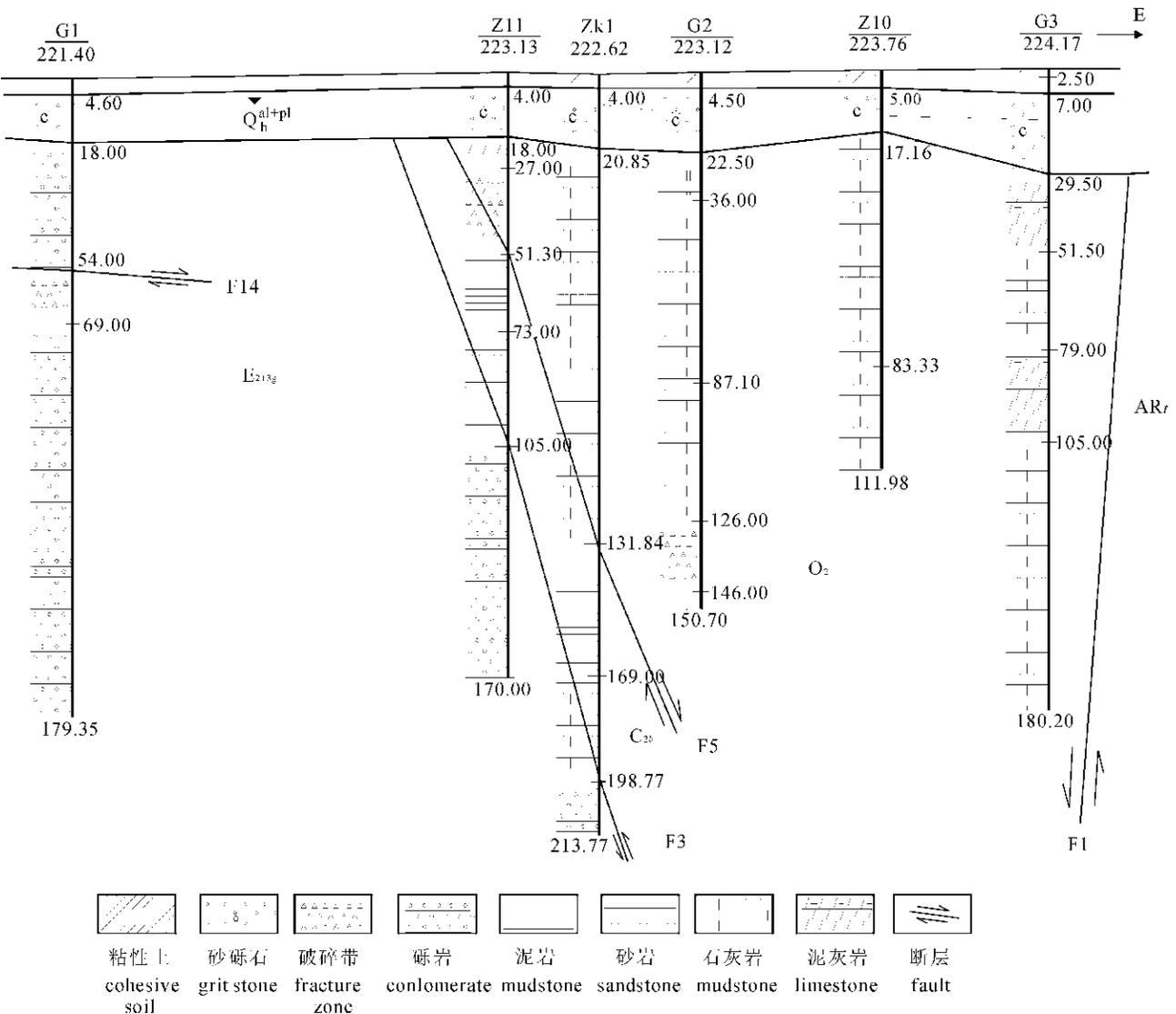


图 2 山东莱芜市鹏山工程地质剖面图

Fig. 2 The engineering geological profiles of Pengshan, Laiwu, Shandong

鹏山水源地的地下水运动可用二维非均质各向异性问题来表达。地下水在二维空间的流动(如果不考虑水的密度变化)可以用下面的偏微分方程来表示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_x h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y h \frac{\partial H}{\partial y}) + W \\ = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) \\ H(x, y, t) |_{\Gamma_1} = \varphi(x, y, t) \\ \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_{21}} = 0 \\ K_x h \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + \\ K_y h \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) |_{\Gamma_{22}} = q(x, y, t) \\ W = W_q + W_p + W_r \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_x, K_y 为渗透系数在 x, y 方向上的分量; H 为水头; h 为潜水含水层的有效厚度, 其值为潜水面到含水层底板的距离; n 为边界 Γ_{21} 和 Γ_{22} 的外法线方向; H_0 为初始水头; W 为源汇项, 包括开采量 W_q , 降雨入渗量 W_p 及河流渗透补给量 W_r ; μ 为孔隙岩溶介质的给水度; t 为时间; Γ_1 为第一类边界; Γ_{21} 为隔水边界; Γ_{22} 为第二类补给边界。

由于研究区的含水层具有非均质各向异性特征, 根据研究区的含水层分布规律和勘探结果分析,

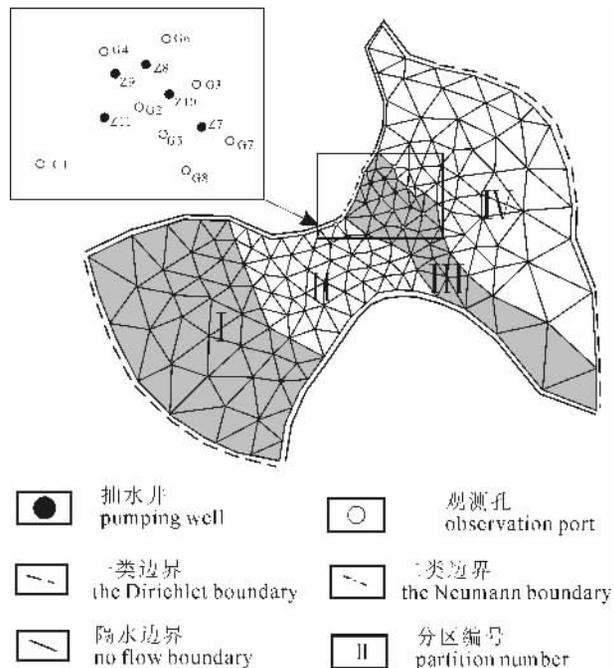


图 3 含水层参数分区及单元离散图

Fig. 3 The subdivision of study area

我们将研究区划分为图 3 所示的四个参数分区。各分区采用三角形有限单元剖分, 离散后的区域剖分图见图 3。

在整体模型识别结果中发现地下水动态观测孔中 G1 和 G7 孔的拟合情况相对而言不如研究区中心的其他观测孔, 主要原因是因为这两个观测孔距离抽水中心较远, 水位变幅较小, 运用全区统一参数寻优时, 他们的贡献比较有限, 因此这两个观测孔的水位变化形态不能得到较好的刻画。而运用区域分解的思想考虑问题时, 由于参数寻优进行在每个子域, 则可使这些权重得到一定的放大。

4.1 水文地质参数确定原则

本次模拟共有四个参数分区, 因此区域分解时属于四子域非重叠型区域分解。各参数分区不存在内交点的问题, 求解时直接利用 D—N 交替法进行人工内边界属性信息的交换。

目标函数表示为:

$$E(K_{xi}, K_{yi}, \mu_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^T [H(i, j) - H_{ob}(i, j)]^2 \quad (3)$$

根据抽水试验结果, 构造特征、含水层性质, 场形态及水位变化特点等资料, 设定各参数的上下限, 作为对应参数的约束区间, 具体数值为:

$$\begin{cases} 1(\text{m/d}) \leq K_{xi} \leq 10(\text{m/d}) \\ 1(\text{m/d}) \leq K_{yi} \leq 10(\text{m/d}) \\ 0.01 \leq \mu \leq 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

4.2 优化结果评价

经过区域分解的寻优, 最终确定了四区的水文地质参数, 参数列于表 2 中。

表 3 列出了各观测孔的具体误差统计。根据表 3 列出的资料, 各观测孔的平均相对误差(与抽水主井的降深相比)百分比均小于 3.00%, 最大相对误差也均在 5.00% 之下, 完全达到水利部规定的误差允许范围。由结果可以看出, 运用区域分解法原理反求水文地质参数基本上是成功的。

表 3 各观测孔拟合误差统计

Table 3 Errors of every observation well

观测孔编号	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
平均误差(m)	0.02	0.06	0.24	0.09	0.23	0.16	0.15	0.07
最大误差(m)	0.05	0.13	0.40	0.13	0.35	0.26	0.32	0.15
平均相对误差(%)	0.23	0.70	2.82	1.06	2.70	1.88	1.76	0.82
最大相对误差(%)	0.59	1.53	4.98	1.53	4.11	3.05	3.76	1.76

5 结论

通过以上的讨论我们可以发现,与传统的串行计算模式相比,基于区域分解思想方法并行求解水文地质参数的方法具有强有力的竞争优势。该方法不仅在计算结果的精度上有所提高,而且节省了大量的时间。由具体问题的计算结果可以看出,该方法基本上是可行的。同时,运用双核计算机更加方便地实现了问题的并行求解。双核计算机适用于运行具有多个进程的程序。在并行技术日益深入的今天,双核计算机将会有着更为广阔的应用前景。

参 考 文 献 / References

唐焕文,秦学志. 2001. 实用最优化方法. 大连:大连理工大学出版社,

135~141.

薛禹群,谢春红. 1980. 水文地质学的数值法. 北京:煤炭工业出版社, 274~290.

席少霖. 1992. 非线性最优化方法. 北京:高等教育出版社, 287~288.

吕涛,石济民,林振宝. 1999. 区域分解算法——偏微分方程数值解新方法. 北京:科学出版社, 269~311.

Dongarra J., Foster I.. 2005. 并行计算综论. 北京:电子工业出版社, 450~452.

王浩然,朱国荣,赵金熙. 2003. 基于区域分解法的地下水有限元与边界元耦合模型. 地质论评, 49(1): 48~52.

王敏,朱国荣,孔祥龙,江思珉,季月华. 2005. 用 Hooke—Jeeves 方法进行水文地质参数寻优的研究. 地质论评, 51(6): 724~727.

王敏,朱国荣,王浩然,江思珉. 2006. 基于区域分解法的水文地质参数寻优研究. 水文地质工程地质, 33(1): 65~68.

陈宝林. 2005. 最优化理论与算法(第二版). 北京:清华大学出版社, 332~359.

孙晓云,蔡远利. 2004. 利用改进遗传算法的参数估计. 控制理论与应用, 23(1): 23~26.

A Study on the Hydrogeological Parameters Parallel Optimization Using the Dual-core Computer

KONG Xianglong, ZHU Guorong, JIANG Simin

Department of Hydrosiences, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Model verification is a very complex job when modeling the groundwater. The complexity is caused by the choice of optimization method, the abnormal parameter peak because of attention to equilibrium and the mass computing time for optimization and so on. In this paper, the hydrogeological model in the whole area is divided into subdomain model based on the idea of DDM when the target function is calculated. The example is applied on the Dual-core computer and the results show that this method for searching the hydrogeologic parameter has high reliability. This step not only reduces the computing time, but also improves the fitness. The method is also applied to the inverse simulation of a water source area in Shandong Province. It is successful to solve the inverse simulation of hydrogeological model according to the results.

Key words: hydrogeological parameters; inverse problem; domain decomposition; parallel solve; Dual-core computer