

高承压含水层水文地质参数局部和全局灵敏度分析

赵 春 虎^{1,2}

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室 陕西 西安 710177)

摘 要: 为研究高承压(大于3 MPa)含水层水文地质参数特征,以矿井奥灰含水层放水试验结果为基础,采用三维地下水模拟软件(Visual MODFLOW)建立煤层底板奥灰地下水系统的三维数值模型,通过模型的拟合校正,分别应用局部和全局参数灵敏度分析方法对高承压含水层渗透系数 K 、弹性给水度 μ 、水头边界 h 进行了灵敏度分析。结果表明, h 对地下水动态变化的影响最为显著,而其他参数的影响则相对较小, μ 在影响水头变化的同时对水头动态的响应时间影响明显,另外参数的全局灵敏度大于其局部灵敏度之和,说明模型总灵敏度偏大。

关键词: 高承压水; 全局灵敏度; 弹性给水度; 放水试验

中图分类号: TD822

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2013)08-0110-04

Analysis on Local and Overall Sensitivity of High Pressurized Hydrological Parameters of Aquifer

ZHAO Chun-hu^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi key Lab of Coal Mine Water Disaster Prevention and Control Technology, Xi'an 710177, China)

Abstract: In order to study hydrological parameters features of the high pressurized(over 3 MPa) aquifer, based on the dewater test results of mine aquifer, a 3D underground water simulation software Visual MODFLOW was applied to establish 3D numerical model of water system in Ordovician limestone under the floor of the seam. With the fitting correction of the model, the sensitivity analysis method of the local and overall parameters individually was applied to the sensitivity analysis on the permeability coefficient of the high pressure aquifer, elastic water feeding yield and water head boundary. The results showed that the water head boundary affected to the dynamic variation of the underground water was obvious and affected to other parameters was less. While the elastic water feeding yield affected to the variation of the water head, the elastic water feeding yield affected to the dynamic response time of the water was obvious. The overall sensitivity of the parameters would be higher than the sum of the local sensitivity and thus the total sensitivity of the model was too high.

Key words: underground high pressurized water; overall sensitivity; elastic water feeding yield; dewater test

0 引 言

数值模拟是地下水研究中一项重要的应用技术,大幅提高了地下水系统研究的定量程度。较之解析法及其他研究方法,能够比较全面系统地处理复杂含水层结构及边界,解决其他一般方法难以处理的水文地质问题^[1-2],目前已成为求解复杂条件下地下水流和溶质运移问题的主要手段,其中灵敏度分析是数值模拟法用于解决地下水问题的重要步骤

之一,可以定性或定量分析地下水系统含水介质的参数特征,单个参数或不同参数组合对模型性能的影响情况,以提高数值模型的仿真程度。但由于其计算过程比较复杂,很多模型并没有对其进行相关的分析。灵敏度分析包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析,局部灵敏度分析只检验单个参数的变化对模型结果的影响程度,所以局部灵敏度分析又称一次变化法;全局灵敏度分析则检验多个参数的变化对模型运行结果总的影响,并分析每一个参数及

收稿日期: 2013-01-14; 责任编辑: 曾康生

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51034003); 陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2011KTZB01-02-02)

作者简介: 赵春虎(1980—),男,陕西宝鸡人,工程师,博士研究生。Tel: 029-87862106, E-mail: zhaochunhu51002@163.com

引用格式: 赵春虎. 高承压含水层水文地质参数局部和全局灵敏度分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 110-113.

其参数之间相互作用对模型结果的影响^[3-5]。全局灵敏度分析相对于局部灵敏度分析,可以计算各参数共同作用对地下水数值模型产生的影响及地下水数值模型的总灵敏度,为模型的参数识别提供更丰富、更全面的信息。关于全局灵敏度分析方法的理论研究成果较多,主要有多元回归法、Morris 法、傅里叶幅度灵敏度检验法(FAST),以及基于方差分析的 Sobol 法^[6-7]等。目前国内对地下水数值模拟的参数灵敏度分析,仍然以局部灵敏度分析为主,实际应用中由于全局灵敏度分析方法计算量大,操作较难,将其运用到地下水数值模型的参数灵敏度分析中尚不多见^[8-12]。笔者以华北地区峰峰煤田九龙煤矿奥灰含水层放水试验成果为基础,采用地下水模拟软件 Visual MODFLOW 建立矿区奥灰地下水系统的三维数值模型,在进行水头拟合的同时,通过局部和全局参数的灵敏度分析,得出合理反映高承压型奥灰含水层的水文地质参数特征,增进了对华北型井田煤层底板奥灰含水层充水条件的认识,对进一步指导华北地区高承压型底板水防治,保障深部煤层安全开采具有较强的理论与实用价值。

1 地下水参数灵敏度分析过程

1.1 放水试验及模型概况

九龙煤矿是华北地区峰峰煤田主力生产矿井,随着开采水平的延深,煤层底板高承压型奥灰水的水害问题突出。研究区水文地质条件复杂,影响该区深部煤炭资源开采的主要含水层包括野青灰岩、伏青灰岩、大青灰岩和奥陶系灰岩含水层,为多层含水层结构。其中对矿井生产安全威胁最大的为具高承压型的奥灰含水层。放水试验中在井下水文孔测得的奥灰含水层水压达 7 MPa 以上,属高承压型矿井,其中 1 个观水孔、4 个井下放水孔。

根据放水试验结果,建立矿区奥灰地下水系统的三维数值模型,平面上划分 330 × 212 个结点,垂直方向上将奥灰按照层段划分为 3 层:第 1 层为峰峰组 8 段,富水性较弱;第 2 层为峰峰组 7 段,富水性强,为此次主要研究层位;第 3 层为奥灰其他层段,富水性较弱。根据经验可预给出各层水动力参数,如渗透系数、弹性给水度等,经反复调整,使观测孔的模拟水头与实测水头的动态趋势及相位基本一致。从水头拟合的数据中,得到水头变化值 $\Delta H \leq 0.5$ m 的占总数的 82.5%, $\Delta H \leq 1$ m 占 92.5%,对

于该水头变化大的高承压含水层,拟合程度高。

1.2 局部参数灵敏度分析

数值模型局部参数灵敏度分析可理解为目标函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, 共有 n 个参数, x_i 是其中第 i 个参数, $f(x_i)$ 是参数 x_i 灵敏度分析在某一固定设计点的函数值,除 x_i 参数外, x_1, x_2, \dots, x_n 在此设计点均为定值, x_i 的在此设计点时微小变化会引起的函数 $f(x)$ 的变化,式(1)为局部参数灵敏度分析数学表达式:

$$S = \partial f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) / \partial x_i |_{x=x_i} \quad (1)$$

其中: S 为函数 $f(x)$ 在设计点参数 x_i 的灵敏度值, $|S|$ 值越大,表示参数 x_i 越灵敏,即对函数 $f(x)$ 的影响也越大。局部灵敏度分析的优点是其操作容易,计算量小,但是不能考虑参数之间相互作用对模型输出结果的影响。

地下水数值模拟计算的目标函数为水头方程 $H(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 共有 n 个参数,其中各参数意义及量纲不同,这样不同参数灵敏度值就无可比性。须对式(1)进行转换得到地下水数值模型参数灵敏度

$$S = \left| \frac{\partial H(x_i)}{\partial x_i} \frac{x_i}{H(x_i)} \right| = \frac{1}{H(x_i)} \left| \frac{\Delta H}{\beta_i} \right| \quad (2)$$

其中: $H(x_i)$ 为参数 x_i 灵敏度分析在固定设计点水头值, m ; x_1, x_2, \dots, x_n 在设计点均为定值, ΔH 为水头变化值, m ; β_i 为参数 x_i 的变化率因子。由式(2)可知在设计点对参数 x_i 进行灵敏度计算时, $H(x_i)$ 在设计点为定值,故 S 与水头变化值 ΔH 成正比,与 β_i 成反比。因此,为了便于比较分析,灵敏度大小以目标函数的水头变化值 ΔH 与参数变化率 β_i 的比值来确定。即 $S = |\Delta H / \beta_i|$ 。

针对影响含水层主要水文地质参数:渗透系数 K , 弹性给水度 μ 及边界水头 h , 采用因子变换法对地下水数值模型 3 个参数进行局部灵敏度分析,即 $f(x) = H(K, \mu, h)$ 。首先选取该模型中各含水层 K 值进行灵敏度分析,同时保持其他参数不变,采用因子变换法将 K 值分别增大 10% 和减小 20%, 每改变一次参数值运行一次该非稳定流模型运算,来计算水头平均值 ΔH 及各参数的 S 值。 μ 、 h 灵敏度计算过程与 K 的灵敏度计算过程类似,据此可分别计算出 ΔH 及 S 值(图 1)。

由图 1 可知:在高承压性含水层中 3 个参数灵敏度均较高,对奥灰水头变化影响大,且 ΔH 与 K 、 μ 及 h 的变化均呈正比关系,即随着 K 、 μ 、 h 的增大,

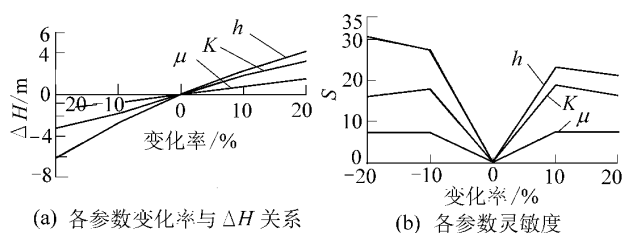


图1 局部参数灵敏度分析

ΔH 增大; K 、 μ 及 h 三个参数的灵敏度 S_K 、 S_μ 、 S_h 大小顺序依次为 $S_h > S_K > S_\mu$, 即 h 变化对 ΔH 变化影响最大, K 次之, 但 μ 的变化不容忽视, 其数量级虽为 10^{-6} , 在参数变化 10% 时, ΔH 达 1 m 以上。另外, 当 μ 值变化时形成最大降深的响应时间发生变化(图2)。由图2可知, 当 μ 减小 20%, 含水层由于释水能力变小, 抽水量不变时水头降低迅速, 形成最大降深的响应时间相对于设计点提前了 140 h 左右, 且在停止抽水后水头恢复快; 当 μ 增大 20% 时, 含水层释水能力增大, 抽水时最大降深相对于设计点的

响应时间滞后了 120 h, 停止抽水后水头恢复慢。而 K 、 h 的变化对水头最大降深的响应时间无影响。通过以上分析, 说明了弹性给水度对高承压含水层水头动态影响明显, 具有较明显的“时间效应”。

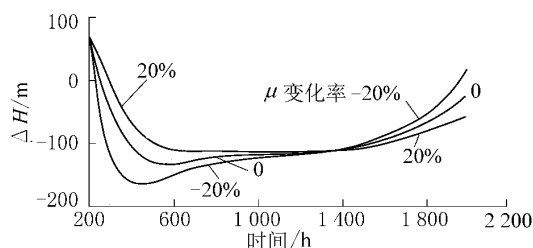


图2 弹性给水度与水头变化

1.3 全局参数灵敏度分析

应用 Morris 法进行该模型的全局灵敏度分析, 参数仍然选取 K 、 μ 及 h , 有 C_1 — C_7 共有 7 种参数组合方式, 根据参数组合情况采用因子变化法对各参数值均增大 2%、5%、10%。计算不同方案下各组合形式的水位平均 ΔH 及 S 值, 见表 1。

表1 不同参数变化情况下的水头变幅

变化率/%	$\Delta H/m$							S						
	$C_1(h)$	$C_2(K)$	$C_3(\mu)$	$C_4(K\mu)$	$C_5(Kh)$	$C_6(\mu h)$	$C_7(K\mu h)$	$C_1(h)$	$C_2(K)$	$C_3(\mu)$	$C_4(K\mu)$	$C_5(Kh)$	$C_6(\mu h)$	$C_7(K\mu h)$
2	0.44	0.36	0.15	0.66	1.01	0.62	1.05	22.12	17.88	7.31	32.88	50.58	30.87	52.6
5	1.18	0.92	0.37	1.64	2.58	1.53	2.68	23.60	18.40	7.40	32.80	51.60	30.60	53.6
10	2.30	1.86	0.76	3.42	5.26	3.21	5.47	23.0	18.60	7.60	34.20	52.60	32.10	54.7

根据模拟结果, 水位变化值取模拟期内的平均值, 求得各参数灵敏度以及多参数共同作用下的灵敏度。全局灵敏度分析结果显示: C_1 、 C_2 、 C_3 组合即局部参数灵敏度; 在 μ 参与下 $S_{(\mu K)} < S_{(\mu h)}$, 可以认为 h 较 K 灵敏, 在 h 参与下 $S_{(h\mu)} < S_{(hK)}$, 可得出 K 较 μ 灵敏, 即 $S_h > S_K > S_\mu$, 与局部灵敏度分析结果相同。但 Morris 法计算的多参数联合灵敏度并不是单参数灵敏度的简单叠加, 如变幅为 10% 时, K 和 h 的局部灵敏度之和为 41.6, 小于二者的联合灵敏度 52.6, K 与 μ 的局部灵敏度之和为 26.2, 小于其联合灵敏度 34.2, 其他组合同样有局部灵敏度之和小于联合灵敏度的现象。从组合 C_7 计算三参数 (K 、 μ 、 h) 的联合灵敏度为 54.7, 即模型的总灵敏度。由于全局灵敏度分析在计算时考虑了其他参数不同取值对目标参数计算的影响, 其结果比局部灵敏度分析更趋于实际, 也更精确。为了更直观地比较各参数的灵敏度大小, 根据表 1 结果绘制了各参数变化率为 10% 时水头变化情况如图 3 所示, 分别表示出了

各参数及相互作用对模型产生的总影响, 在各参数都增加 10% 的情况下, 水头变化值 ΔH 为 5.47 m, 说明了该模型参数对水位动态的影响大。

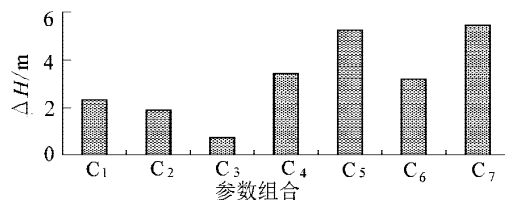


图3 各组合参数变幅为 10% 时水头变幅化

3 结 论

通过对高承压型奥灰含水层三维地下水数值模型参数的局部、全局灵敏度分析, 得出该高承压型地下水数值模型中 $S_h > S_K > S_\mu$, 各参数都增加 10% 的情况下, 模型的总灵敏度为 54.7, 水头相对升高了 5.47 m, 说明高承压型的边界类型为水头边界时, 对计算水头动态具有较强的控制作用, 导致模型的总灵敏值偏大, 灵敏度越大, 参数的控制性强, 模型相

对不稳定,所以高承压型地下水系统模拟过程中应重点针对该边界条件进行分析研究,应选择合适的边界水头值或根据边界水文地质资料情况避免选用水头边界类型。另外,渗透系数影响作用一般,弹性给水度虽对水头变幅影响不明显,但对水位动态响应时间影响明显,即弹性给水度越小,水头动态响应越快,反之亦然,所以高承压型含水层模拟过程中应注重弹性给水度的时间效应。数值模拟是解决地下水问题的一个非常重要的方法,目前数值模拟中主要以局部灵敏度分析方法为主,笔者针对高承压型的地下水数值模型应用因子变化法和 Morris 方法进行了局部、全局灵敏度分析的一些分析,对于灵敏度分析的其他方法未进行探讨,另外由于资料所限本次引用模型的参数较少,在一定程度上也影响了模型的总灵敏度计算。

参考文献:

- [1] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 20-21.
- [2] 靳德武, 刘其声, 王林. 等. 煤矿(床)水文地质学的研究现状及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(5): 28-31.
- [3] 束龙仓, 王茂枚, 刘瑞国. 等. 地下水数值模拟中的参数灵敏度

分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 491-495.

- [4] Lenhart T, Eckhardt K. Comparison of Two Different Approaches of Sensitivity Analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(3): 645-654.
- [5] Crosettom, Tarantolas. Uncertainty and Sensitivity Analysis: Tools for GIS-based Model Implementation[J]. INT J Geogr Inf Sci, 2001, 15(5): 415-437.
- [6] 赵春虎, 丁湘, 王皓. 等. 高承压型矿井奥灰含水层数值模拟研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(3): 47-49.
- [7] 胡中信, 许进鹏, 郑世书. 华北煤矿奥灰突水特点及其防治对策研究[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(10): 34-36.
- [8] 曹代勇, 占文峰, 张军. 等. 邯郸-峰峰矿区新构造特征极其煤炭资源开发意义[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 141-145.
- [9] 潘国营, 武强, 董东林. 等. 焦作矿区岩溶裂隙网络渗流特征及研究方法[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 566-570.
- [10] McKay D, Beckman R J, Conover W J. A Comparison of Three Methods of Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code[J]. Technometrics, 1979, 21(4): 239-245.
- [11] 刘国, 毛邦燕, 许模. 等. 合山煤田矿井涌水量的数值模拟探讨[J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 98-103.
- [12] Sobolim. Sensitivity Estimates for Nonlinear mathematical Models[J]. Mathematical Modelling Computational Experiments, 1993, 1(4): 407-414.

《煤矿矿长保护矿工生命安全七条规定》公布

国家安全生产监督管理总局令第 58 号《煤矿矿长保护矿工生命安全七条规定》已于 2013 年 1 月 15 日由国家安全生产监督管理总局局长办公会议审议通过,并于公布之日起施行,具体规定如下:

- 一、必须证照齐全,严禁无证照或者证照失效非法生产。
- 二、必须在批准区域正规开采,严禁超层越界或者巷道式采煤、空顶作业。
- 三、必须确保通风系统可靠,严禁无风、微风、循环风冒险作业。
- 四、必须做到瓦斯抽采达标,防突措施到位,监控系统有效,瓦斯超限立即撤人,严禁违规作业。
- 五、必须落实井下探放水规定,严禁开采防隔水煤柱。
- 六、必须保证井下机电和所有提升设备完好,严禁非阻燃、非防爆设备违规入井。
- 七、必须坚持矿领导下井带班,确保员工培训合格、持证上岗,严禁违章指挥。

(摘自:国家安全生产监督管理总局网站)

安监总局煤监局确定煤矿安全生产“七大攻坚举措”

一要深化煤矿整顿关闭工作。要明确目标任务并落实到每个地区、每个县乡和每个煤矿,落实和完善相关政策措施,切实把不符合标准条件的煤矿关死关死。同时要结合产业结构调整、兼并重组、技术改造,深化煤矿整顿关闭。

二要严格新建(整合)煤矿安全准入。完善安全准入标准,严把进口、提高门槛,特别是对地质条件复杂、煤与瓦斯突出、高瓦斯矿区,现有技术条件难以做到安全开采的,要以安全为前提,严格限定

标准,防止拆大建小、前关后建。

三要深入开展隐蔽致灾因素普查和瓦斯抽采利用。要大力推动省及以下开展区域性普查,特别复杂灾害要由国家层面组织开展。要利用物探等方面的高新技术,同时借鉴其他领域的先进技术装备,全面详细勘查所面临的瓦斯、地压、水害、火灾等灾害分布及治理状况,健全专业队伍,研究制定政策,加大资金投入,落实和完善预防性保障措施。进一步深化瓦斯抽采利用,切实抓好目标、任务、标准、重点项目、资金投入、支持政策、保障措施的落实,促进瓦斯有序高效开发。

四是大力推进采掘机械化、自动化和管理信息化。要摸清当前煤矿的“三化”程度和水平,选准主攻方向,结合有关地区创造的经验,区分不同区域、不同井型和不同条件煤矿,明确达标任务,制定实施方案,从根本上增强煤矿的安全技术装备水平。

五要强化煤矿安全避险“六大系统”建设。要认真贯彻落实国务院 2010 年 23 号文件规定,义无反顾抓好煤矿监测监控、人员定位、紧急避险、压风自救、供水施救和通信联络等系统建设应用。要坚持实事求是、因矿制宜,确保实用管用。

六要大力提升煤矿应急救援能力。要结合国家级、区域性矿山救援基地建设,抓紧完善救援装备和物资储备,特别是水害多发地区要配备一定抽水能力的水泵、管线等,关键时刻快用快抽;同时要加强对救援信息化建设,提高救援队伍素质,增强快速反应、现场处置、高效救援能力。

七是规范煤矿用工制度,强化矿工安全培训。要认真分析吸取一些煤矿事故所暴露出的深刻教训,与相关部门研究完善农民工、外来工、外包工的用工制度,加强安全培训,提高矿工技能素质,严禁新招工人不培训或虽经培训但未掌握基本防范技能就下井。

(摘自:国家安全生产监督管理总局网站)