

[文章编号] 1671-9727(2003)04-0356-06

FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用

贺国平 邵景力 崔亚莉 张德强

(中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083)

[摘要] 介绍了基于有限元原理的 FEFLOW 软件, 它的应用领域覆盖了水量、水质与温度的模拟, 软件提供地理信息系统数据接口, 能自动产生空间有限单元网格。FEFLOW 程序包中配备了快速精确的数值算法来控制 and 优化求解过程, 结果输出具有先进的图形可视化效果, 并能很好地处理相关的水文地质条件。举例说明了 FEFLOW 软件在建立黄河下游影响带三维地下水流模拟模型中的应用。

[关键词] 有限元原理; 水文地质条件; 影响带; 模拟模型

[分类号] TP319: P641.7

[文献标识码] A

利用数值模拟软件对地下水流和溶质运移等问题进行模拟的方法以其有效性、灵活性和相对廉价性逐渐成为地下水研究领域的一种不可缺少的重要方法, 得到了广泛的应用。模型计算指的是进行地下水流或溶质运移正反演计算, 常用的方法主要是有限差分法、有限元法、边界元法等^[1]。

有限差分法是一种古典的数值计算方法, 其基本思想是: 用渗流区内有限个离散点的集合代替连续的渗流区, 在这些离散点上用差商近似地代替微商, 将微分方程及其定解条件化为以未知函数在离散点上的近似值为未知量的代数方程(称之为差分方程), 然后求解差分方程, 从而得到微分方程的解在离散点上的近似值^[2]。

美国地质调查局在 20 世纪 80 年代开发的 MODFLOW (Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model) 为有限差分的典型代表。该软件包括水井、补给、河流、沟渠、蒸发蒸腾和通用水头边界六个子程序包, 分别用来处理相关的水文地质条件^[3]。自 MODFLOW 问世以来, 不断有新的子程序包被开发出来。例如

用来模拟水位下降引起地面沉降的子程序包^[4], 用来模拟水平流动障碍 (Horizontal flow-barrier) 的子程序包等^[5]。新子程序包的加入, 使 MODFLOW 的应用范围不断扩大。实践证明, 只要合理使用, 它也可以用来解决许多地下水在裂隙介质中的流动问题。经过合理的线性化处理, MODFLOW 还可以用于解决空气在土壤中的运动问题^[6]。如果将它与其他用于溶质运移模拟的程序结合起来, 可以用来模拟诸如海水入侵等地下水密度为变量的问题^[7]。

有限单元法是求解偏微分方程定解问题的另一种有效的数值方法, 它的基本思想早在 20 世纪 40 年代就已经提出。有限单元法成功地解决了众多领域的许多计算问题, 例如结构力学、结构工程中的应力分析, 结构稳定性问题; 土力学、岩石力学中的应力变形与稳定性分析等; 水利工程的液体流动、水工结构和坝体分析以及地下水流、水动力弥散问题等。

20 世纪 70 年代末, 德国 WASY 水资源规划和系统研究所开发了基于有限单元法的 FEFLOW (Finite element subsurface FLOW

[收稿日期] 2002-09-03

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (G19990436) 和河南省发展计划科技攻关项目 (2000) 2 号 (001190109) 联合资助

[作者简介] 贺国平 (1975-), 男, 博士生, 水资源与环境专业 (E-mail: hgp99@sohu.com)

system) 软件, 它是迄今为止功能最为齐全的地下水模拟软件包之一。该软件包具有图形人机对话、地理信息系统数据接口、自动产生空间各种有限单元网格、空间参数区域化及快速精确的数值算法和先进的图形视觉化技术等特点。在 FEFLOW 系统中, 用户可以很方便迅速地产生空间有限单元网格, 设置模型的参数和定义边界条件, 运行数值模拟以及实时图形显示结果与成图。

1 FEFLOW 简介

从 FEFLOW 的问世起一直到现在, 在理论研究和解决实际问题的处理上, 它经过了不断的发展、修改、提高, 在它的发展过程中, FEFLOW 经过了大量的测试和检验, 它成功地解决了一系列与地下水有关的实质性问题, 如判断污染物迁移途径、追溯污染物的来源、地热的模拟、海水入侵预测等。

1.1 FEFLOW 的应用领域

水量模拟: 模拟水源地开采或者油田注水对区域地下水流场的影响、模拟水库放水或者河流断流时, 河道沿线地下水流场的变化等; 水质模拟: 模拟污染物在地下水中的迁移过程及其时间空间分布模式^[8]、模拟沿海地区抽取地下水引起的海水入侵等^[9]; 温度模拟: 模拟非饱和带以及饱和带温度场的分布^[10]。

1.2 系统输入特点

通过标准数据输入接口, 用户既能直接利用已有的 GIS 空间多边形数据生成有限单元网格, 也可以基于地图用鼠标设计, 网格的数目可以自己指定, 可以方便地调整网格的几何形状, 增加和放疏网格大小等。用户可以视具体情况定义第一、第二和第三类边界, 而且还可以对边界条件增加特定的限制条件; 能方便地定义复合含水层中的分层开采井和混合开采井以及注水井。所有边界条件及其限制条件、渗透系数、补排量既可设置为常数, 也能定义为随时间变化的函数。FEFLOW 提供了克里格(Kriging)、阿基玛(Akima)和距离反比加权(DW)三种方法, 对离散的空间抽样数据进行内插或外推。输入数据格式既可以是 ASCII 码文件, 也可以是 GIS 地理信息系统文件, 如 ArcView 的 shp 格式。

1.3 FEFLOW 配备了若干先进的数值求解法来控制和优化求解过程

快速直接求解法, 如 PCG, BICGSTAB, CGS,

GMRES 以及带预处理的再启动 ORTHOMIN 法; 灵活多变的 upwind 技术, 如流线 upwind, 奇值捕捉法 Shock capturing, 以减少数值弥散; 皮卡和牛顿迭代法求解非线性流场问题; 自动调节模拟时间步长; 模拟污染物迁移过程包括对流、水动力弥散、线性及非线性吸附、一阶化学非平衡反应; 为非饱和带模拟提供了多种参数模型, 如指数式 Van Genuchten 式和多种形式的 Richard 方程; 垂向滑动网格(BASD)技术处理自由表面含水系统以及非饱和带的模拟^[11]; 开放性外部程序接口, 以使用户在 FEFLOW 系统中连接和使用自己的程序模块。

1.4 系统结果输出及显示

FEFLOW 提供了其他任何地下水模拟软件都无法比拟的、丰富实用的图形显示和数据结果分析工具。其先进的图形视觉化及数据分析技术表现在: 有限单元网、边界条件和模型参数的三维可视化及显示; 标量数据的三维彩色(透明或灰度)等势面显示以及其二维平面彩色或等值线显示; 三维地下水流径追踪、流动时间及流速动画显示(包括二维平面、剖面投影或二维平面追踪); 三维体截段的空间显示和三维交叉剖面组的空间显示; 三维图形的任意旋转、二维、三维图形的放大或缩小; 总体和局部水量平衡分析(包括任意几何多边形内的水流通量分析); 计算和图形显示通过各种边界条件的水通量、物质通量以及其在特定时间区间内的积分量。

2 FEFLOW 中特殊水文地质问题的处理

2.1 地层的不连续

在 FEFLOW 中, 三维模型的空间结构是由许多层(layer)组成, 这些层由片(slice)隔开, 每两片中就是一层(图1)。网格、边界条件、初始条件是对应于片, 而参数(给水度、渗透系数等)是对应于层。FEFLOW 只能处理延伸到整个研究区域的片和层, 所以, 理论上 FEFLOW 不能处理地层不连续等特殊情况。

2.1.1 地层的缺失

地层由于地壳的抬升而受强烈的剥蚀, 含水岩层出露地面(图1), 或者含水层缺失。FEFLOW 在处理这种情况时, 仍然认为地层是连续到整个研究区域; 只是在地层缺失的地方, 认为厚度是无

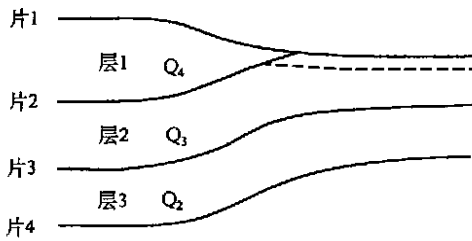


图 1 层与片的概念
Fig 1 Conception of slice and layer

限小, 默认是 0.01 m, 其参数参考相邻层的参数值。

2.1.2 断层

断层是地层发生错位, 是一种特殊的水文地质条件。到目前为止, FEFLOW 还没有很好的方法来处理断层、跌水现象, WASY 公司也一直设法解决这一难题。常用的处理方法是把断层部分作为一个单独的参数分区, 根据断层两边的水力联系程度来确定含水层的参数(主要是渗透系数)。

2.1.3 小面积强透水带的处理

当遇到天窗或者渗透系数非常大的区域时(这些区域的面积往往比较小), 可以把它隔离出来当成一单独的层(图 2)。在这一特殊的层上, 强透水带位置的厚度、渗透系数等参数按照实际赋值; 除此之外的地方, 参数考虑相邻层相应的参数。

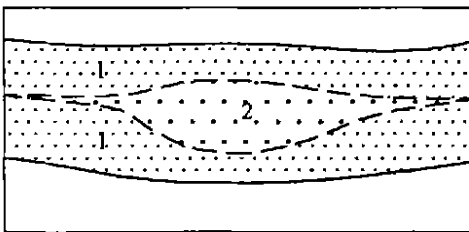


图 2 小面积强透水带
Fig 2 Intense permeable zone in small area
1. 含水层; 2. 强透水带

2.2 第三类边界——混合边界

河流在 FEFLOW 中是作为第三类边界处理。河流通过底积层和含水层发生水力联系(图 3)。根据达西定律有

$$q_n = k_{0, \text{in}} \frac{\Delta h}{\Delta l} = -k_{0, \text{in}} \frac{h_R - h}{d} \quad (1)$$

式中: q_n 为横截面法线上的交换量; $k_{0, \text{in}}$ 为河

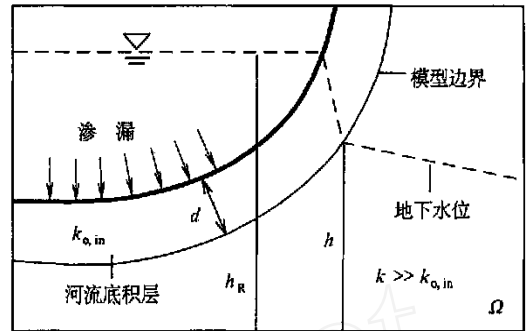


图 3 河流横剖面示意图

Fig 3 Schematic cross section of a river
 Ω 渗流区域; k 含水层渗透系数; h_R 河流水位;
 d 河流底积层厚度; h 地下水位; $k_{0, \text{in}}$ 底积层渗透系数

流底积层的渗透系数; h_R 为河流水位; h 为地下水位; d 为底积层厚度。令 $\phi_{\text{in}} = \frac{k_{0, \text{in}}}{d}$ (当河流补给地下水时, 河流参数为 ϕ_{in} ; 当地下水补给河流时, 河流参数为 ϕ_{out} , 在 FEFLOW 中可以分别指定这两个参数), 于是有

$$q_n(x_i, t) = \phi_{\text{in}}(h_R - h) \quad (2)$$

从(2)式看出, 进入含水层的水量与河流的属性(底积层的厚度和渗透系数)和水位有关, 属性值为常数, 而水位一般随时空变化。

当动态地模拟一条河流时, 需要知道河流在典型水文年的水位动态曲线。例如已知两个水文站的水位历时曲线, 采用一维线性插值方法, 可以得到沿主流道任意结点的水位历时曲线。然而这种插值法用来模拟短期内洪水对地下水的影响时就会出现较大的误差, 因为它认为上游和下游水位变化是同步的, 没有考虑时间滞后的影响; 也就是说上游和下游的水位同时到达历时曲线的波峰和波谷(图 4), 这种结果并不是所需要的。

为了解决上述问题, FEFLOW 提供了一种考虑时间滞后的一维线性插值方法, 通过这种插值(图 5), 可以非常准确地模拟一场暴雨后, 沿河附近区域地下水位的变化。

3 FEFLOW 软件的缺点

FEFLOW 最大的缺点是用于处理源汇项的 In Or Out Flw 菜单功能过于集中, 各个补排项没有单独的子程序包。这样虽然节省了许多源代码, 但是却给调参带来麻烦。为了节省调参所需的时间, 在前处理中必须对各个补排项进行累计, 求出其代数和(借助自编的程序)。这样在调参过程

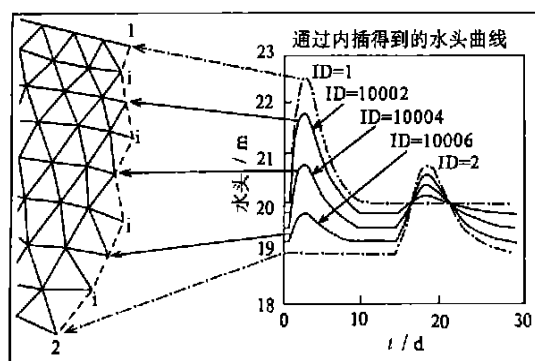


图4 没有考虑时间的一维线性插值

Fig. 4 ID linear interpolation without time level interpolation

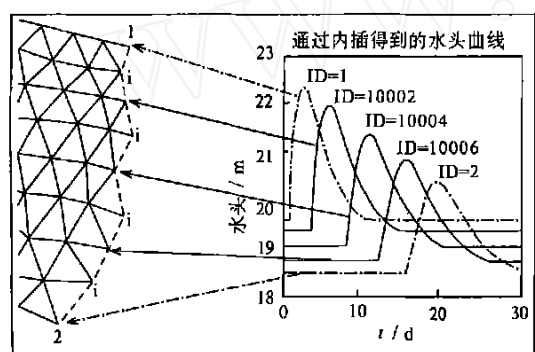


图5 考虑时间的一维线性插值

Fig. 5 ID linear interpolation with time level interpolation

中, 即使对补排项进行较小的改动, 只要运行自编的程序, 补排项的代数和就能瞬间得出, 然后按一定的格式存储于固定的文件, 运行 FEFLOW 时只要调用这一文件即可。

4 应用实例

4.1 研究区水文地质概况

研究区位于黄河的下游, 河南省的东北部, 地势平坦, 地貌上属于黄河冲积平原。地下水主要赋存于第四系松散沉积物之中, 总厚度超过 300 m。根据地下水的埋藏条件, 可分为 4 个含水层, 分别对应着 Q_4 、 Q_3 、 Q_2 和 Q_1 层。结合地下水动力条件和开采情况, 可将以上 4 个含水层归并为浅层潜水、微承压水含水层组 (Q_4 和 Q_3) 和深层承压含水层组 (Q_2 和 Q_1)。地下水的主要补给方式为大气降水入渗、渠系渗漏、灌溉入渗和黄河侧渗补给, 主要排泄方式为蒸散发和人工开采。地下水的开采主要集中在黄河两侧以及黄河古河道, 以开采浅层水为主, 部分地段开采深部承压水。目前地

下水年总开采量为 $1.152 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中浅层水开采量为 $1.043 \times 10^9 \text{ m}^3$, 深层水开采量 $0.109 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

4.2 研究区边界的确定

研究区的边界就是黄河影响带的范围, 即黄河水的侧渗宽度和循环深度。为了准确刻划出黄河影响带的范围, 于 2000 年 11 月和 2001 年 5 月进行了两次浅层地下水位的统一调查, 并取得地下水同位素样品 43 个, 其中黄河水水样 5 个、潜水样 26 个 (埋深 60 m 以内)、承压水样 12 个 (埋深 150~400 m)。采用浅层地下水流场分析法、水动力学解析法、同位素分析法结合具体的水文地质条件, 确定了黄河影响带的范围, 约 10~25 km^[12]。根据同位素取样分析和钻孔资料初步确定了黄河水的循环深度, 小于 350 m。

黄河概化的正确与否直接影响黄河和地下水之间侧渗量的准确性。由于黄河为“地上悬河”, 且河床底部存在稳定的弱透土层; 同时考虑 FEFLOW 的特点, 将黄河概化成第三类边界。黄河侧渗量为黄河水位的函数, 黄河主河道上水文站的水位历时曲线, 通过时间滞后的一维线性插值方法, 可以得到主河道上任意结点的水位历时曲线。因此, 只要已知任一年内的黄河水位, 理论上都可以非常准确地模拟黄河的侧渗量。

4.3 三维地下水流模拟模型及其识别

研究区内水文地质概念模型概化为非均质、各向同性、空间三维结构、非稳定地下水流系统。采用 FEFLOW 软件对地下水流进行模拟, 采用三角形剖分, 沿黄河两岸和水源地附近加密网格, 共剖分 17 230 个结点和 26 304 个单元。模拟时期选择 1999 年 1 月到 12 月, 时间步长由模型自动控制。源汇项包括降水、灌溉回渗、蒸发、人工开采等, 各项均换算成相应分区的开采强度, 然后分配到相应的单元格。各水文地质单元分区的参数初值主要来自于相关的水文地质报告。运行 FEFLOW, 可得到在给定水文地质参数和各均衡项条件下的地下水位时空分布, 通过拟合同时期的流场和长观孔的历时曲线, 识别水文地质参数、边界值和其他均衡项, 使建立的模型能更准确地定量描述研究区地下水系统。

4.4 研究成果

研究表明, 1999 年研究区地下水系统总补给量为 $2.639 \times 10^9 \text{ m}^3$, 总排泄量 $2.656 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。浅

层含水层组总补给量为 $2\ 622 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中降水入渗量占 47.11%, 河渠入渗量占 22.41%, 灌溉回渗量占 15.02%, 黄河侧渗补给量占 12.86%, 总排泄量为 $2\ 630 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。多年平均浅层地下水补给资源量约 $2\ 835 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$; 75% 降水保证率下, 浅层地下水资源总补给量为 $2\ 600 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。浅层可开采资源量为 $1\ 941 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$, 深层可开采资源量为 $0\ 249 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

傍河水源地开采条件下, 黄河侧渗增量占水源地开采量的 65% ~ 75%; 8 个拟建水源地同时开采时, 黄河侧渗增量占水源地开采量的 67.34%, 水源地开采 10 年后地下水位趋于稳定^[13]。截渗墙埋深为 20 m 和 45 m, 模型运行一年后, 黄河侧渗量分别较 1999 年减少了 $0\ 175 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0\ 238 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占黄河侧渗量的 5.50% 和 7.48%^[14]。距离黄河大堤 10 km 以外, 流场基本不受截渗墙的影响。

最近上市的 FEFLOW 5.0, 其颜色已经不再局限于 256 色。随着处理蒸发和断层的子程序包的开发, FEFLOW 功能更加完善。综上所述, FEFLOW 软件能很好地处理相关的水文地质条件, 具有简便的操作、快速精确的数值算法和先进的图形可视化技术等特点。随着 FEFLOW 的日益普及, 它必将成为水文地质学上一个强有力的数值模拟工具。

[参 考 文 献]

- [1] 丁继红, 周德亮, 马生忠. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J]. 勘察科学技术, 2002, (1): 37- 42
- [2] 孙讷正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [3] McDonald M G, Harbaugh A W. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model[M]. U S Geological Survey Open-File Report 83- 875, 1988
- [4] Leake S A, Prudic D E. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference groundwater flow model [A]. U S Geological Survey Open-File Report [C]. 1988 88- 482
- [5] Hsieh P A, Freckleton J R. Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U. S Geological Survey modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model [A]. U S Geological Survey Open-File Report [C]. 1993 92- 477.
- [6] Joss C J, Baehr A L. An adaptation of the groundwater-flow code MODFLOW to simulate three-dimensional air flow in the unsaturated zone[A]. U S Geological Survey Open-File Report [C]. 1995 94- 533
- [7] Boxton H T, Modica E. Patterns and rates of groundwater flow on Long Island, New York [J]. Ground Water, 1992, 30(6): 857- 866
- [8] Diersch H J. Interactive, graphics-based finite element simulation of groundwater contamination processes [J]. Adv Engineering Software, 1992, 15: 1- 13
- [9] Diersch H J. Finite element modelling of recirculating density-driven saltwater intrusion processes in groundwater [J]. Advances in Water Resources, 1988, 11(1): 25- 43
- [10] Diersch H J, Kolditz O, Jesse J. Finite element analysis of geothermal circulation processes in hot dry rock fractures[J]. Zeitschr Angew Math Mech, 1989, 69(3): 139- 153
- [11] Diersch H-J G, Michels I. Moving finite element meshes for simulating 3D transient free surface groundwater flow and transport processes [A]. Computational Methods in Water Resources XI, Vol 1 Computational Methods in Subsurface Flow and Transport Problems [C]. Southampton: Comp Mech Publ, 1996 85- 92
- [12] 赵云章, 邵景力, 闫震鹏, 等. 黄河水对两侧地下水补给范围的初步研究[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 3- 5
- [13] 邵景力, 崔亚莉, 赵云章, 等. 黄河下游影响带(河南段)三维地下水流数值模拟模型及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(1): 51- 55
- [14] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉. 黄河下游截渗墙对地下水影响的数学模型与评价[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 22- 23

APPLICATION OF FEFLOW TO GROUNDWATER FLOW SIMULATION

HE Guo-ping, SHAO Jing-li, CUI Ya-li, ZHANG De-qiang

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: Simulations groundwater flow or solute transport by using numerical simulation software is becoming an absolutely necessary way in the groundwater research field. The software of FEFLOW, which is based on the finite-element theory, is introduced in detail in this paper. Application areas of FEFLOW involve the simulations of water quantity, water quality and heat. This software provides data interfaces for the geographic information system and can produce spatial finite element grids automatically. It is equipped with fast and precise numeric algorithms to control and optimize the solution procedure, and advanced visual figures are embodied in output results. In addition, it can deal with corresponding hydrogeologic conditions well. The application of FEFLOW to the buildup of a three-dimensional groundwater simulation model about the influence zone of the lower Yellow River is illustrated.

Key words: finite-element theory; hydrogeologic conditions; influence zone; simulation model