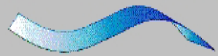


FEFLOW



Finite Element subsurface FLOW system

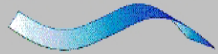
# FEFLOW 有限元地下水系统模拟软件介绍

---

**Finite Element subsurface FLOW system**

中国国际地下水模型中心

---

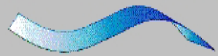


## FEFLOW发展史

---

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) 是有限元地下水数值模型的杰出代表，由德国WASY公司于1979年开发的，最初用FORTRAN IV编写的，此后不断得到改进，90年代初期，FEFLOW4.0版本已扩展为3D并应用于水流，溶质运移模拟；1996 - 1998年间FEFLOW的数值性能和数据界面得到扩展，模型后处理器功能增强；发展到21世纪以来它的版本已经升级到5.2，具备良好的GIS数据接口，优化的剖分网格技术，良好的可视化效果等很多优点。

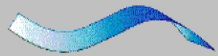
---



## FEFLOW的应用领域

---

- 模拟地下水区域流场及地下水资源规划和管理方案
  - 模拟矿区露天开采及地下水开采对区域地下水的影像及其最优对策方案
  - 模拟近海岸区抽取地下水或矿区抽排地下水引起的海水或深部盐水入侵问题
  - 模拟非饱和带以及饱和带地下水流及其温度场分布问题
  - 模拟污染物在地下水中迁移过程及其时空分布模式
-



## FEFLOW的地下水模拟功能

---

- 可以模拟三维空间水流模型，二维平面、二维剖面或者轴对称二维水流模型
  - 可以对非稳定流或稳定流及多层自由表面含水层进行模拟，包括潜水含水层中的上层滞水模拟
  - 可以对化学物质迁移及热传递模拟，包括温度、盐份迁移模拟、可变密度流场模拟（盐水或海水入侵问题）
  - 也可以对非饱和带流场及物质迁移进行模拟。
-

# FEFLOW的特点和功能

---

## 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空间图形数据生成有限单元网格，也可以手动调整网格几何形状，加密或放疏网格。在建立地下水流模型时用户可以对边界条件增加特定的限制条件，以避免异常解的出现。所有模型参数、边界条件及附加条件既可设置为常数，也可定义为随时间变化的函数。FEFLOW提供克里金(Kriging)，阿基玛(Akima)和距离反比加权法(IDW)等插值方法。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。

---

## 系统模型求解特点

---

FEFLOW采用加辽金法为基础的有限单元法来控制和优化求解过程，内部配备了若干先进的数值求解法来控制和优化求解过程：

- (1) 快速直接求解法，如PCG，B ICGSTAB，CGS，GMRES。
  - (2) 灵活多变的up-wind 技术，如流线up-wind，奇值捕捉法Shock capturing,以减少数值弥散。
  - (3) 皮卡和牛顿迭代法求解非线性流场问题，据此自动调节模拟时间步长。
  - (4) 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。
  - (5) 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。
  - (6) 变动上边界(BASD)技术处理带自由表面的含水系统以及非饱和带的模拟。
  - (7) 有限单元自动加密或放疏技术。
  - (8) 实时显示非稳定流模拟过程中的水位和污染物动态变化值。
-

## 输出特点

---

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。其先进的图形可视化及数据分析技术表现在：

- (1) 有限单元网格、边界条件和模型参数的三维可视化；三维彩色等势面显示以及二维平面彩色或等值线显示；
  - (2) 三维地下水流线追踪，流动时间及流速动画显示；
  - (3) 三维交叉断面图、剖面图与切片图显示；
  - (4) 三维图形的交互旋转、放大或缩小；
  - (5) 模型整体和局部水量均衡分析(包括任意几何多边形内的水流通量分析)；
  - (6) 各种边界条件上的水流通量、物质通量以及在特定时间、空间内的水流积分量都可以由模型算出并以图形显示出来。
-

## FEFLOW数据交换和文件格式

FEFLOW支持GIS ARC/INFO和Arcview文件，  
它具有强大的、良好的GIS接口。下表归纳了其中使用的文件

| 信息类型          | 文件扩展名  | 建议采用子目录       |
|---------------|--------|---------------|
| 超大元网格数据       | *.smh  | supermesh     |
| 有限元数据         | *.fem  | femdata       |
| 帮助            | *.html | help          |
| 简化结果数据        | *.dar  | results       |
| 图像（扫描数据库）     | *.tif  | import+export |
| 线ASCII文件      | *.lin  | import+export |
| 多边形ASCII文件    | *.ply  | import+export |
| GRID ASCII 文件 | *.asc  | import+export |
| ESRI shape 文件 | *.shp  | import+export |





Finite Element subsurface FLOW system

| 信息类型          | 文件扩展名 | 建议采用字目录       |
|---------------|-------|---------------|
| 注释文件          | *.txt | plot          |
| 点ASCII文件      | *.pnt | import+export |
| FEPLOT绘图文件    | *.plx | plot          |
| 时变幂函数数据库三元组数据 | *.pow | plot          |
| 完全成果数据        | *.dac | result        |
| AutCad DXF    | *.dxf | plot          |
| 绘图描述 (XPLOT)  | *.fpd | plot          |

## 处理复杂含水层分层的技巧

当地下水系统含水层结构庞大，岩性分带复杂，沉积厚度和岩性各地变化不一时，在分层概化时会遇到很多困难。总的变化规律是：从山前至平原，沉积厚度由薄变厚，颗粒由粗变细，由单一的砂砾石层过渡到多层砂和粉砂、细砂、粘土等的互层。

在FEFLOW中，认为各个含水层在水平方向上都是连续延伸至整个研究区域，在山前单一层的地方，认为下面的含水层厚度无限小，模型内部自动给默认值0.01m，其水文地质参数参考单一层的值（见图1）。

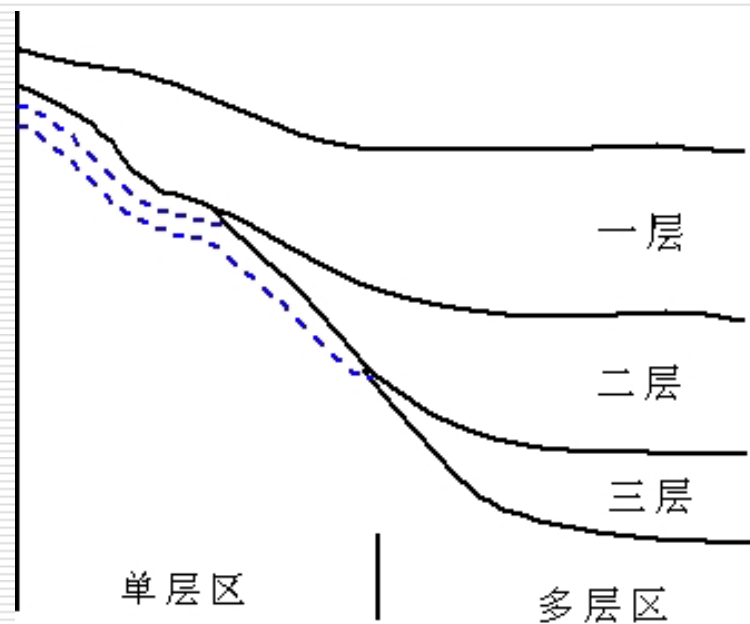


图1 单层 - 多层结构含水层的虚拟结构  
Fig.1 virtual structure of aquifers from a single layer to multi-layers

## 河流处理

对于以河流为边界的大区域模型，为了更好地刻画河流上、下游水位或流量变化，可以采用FEFLOW中的一维线性差值法，即从外部调入模型中与边界重叠的线文件，要已知两个端点处的值，调用命令即可得到沿主流道任意结点的水位、流量历时曲线（见图2）。

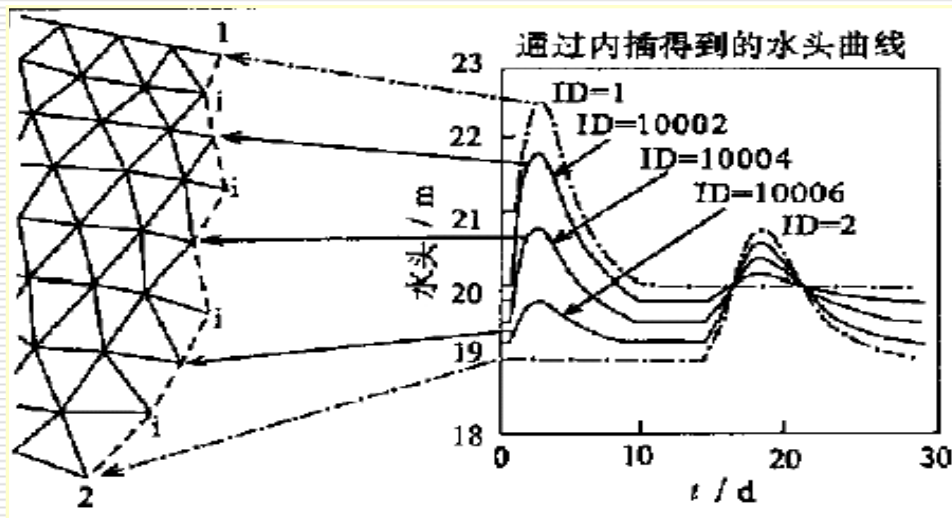


图2 沿河流边界的不考虑时间的一维线性插值 内插的数值用编号*i*表示  
Fig.2 Results of linear 1D interpolation without time levels along the river line. Interpolated “internal” power functions are marked with “*i*” in the mesh graphic

对于模拟短期内河流水位或流量变化特征，就需要考虑上下游水位之间的时间滞后，为解决这个问题，FEFLOW中提供了另一种考虑时间滞后的一维线性插值方法，可以更准确地模拟河流边界变化（见图3）。

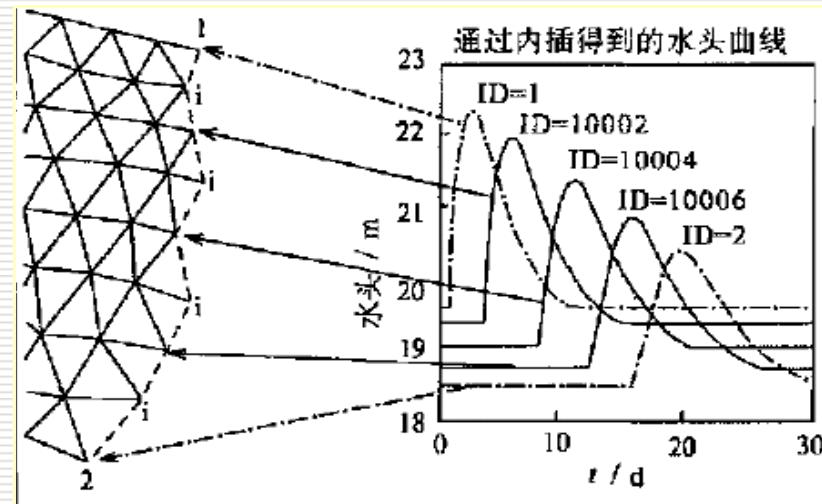


图3考虑时间滞后的一维线性插值  
Fig.3 1D linear interpolation scheme with interpolation of the time levels

## BASD技术

BASD ( Best-Adaptation-to-Stratigraphic-Data, 地层数据最佳适线法 ) 技术指把包含地层初始结构的模型数据和能适应自由面移动的有限单元网格进行结合。

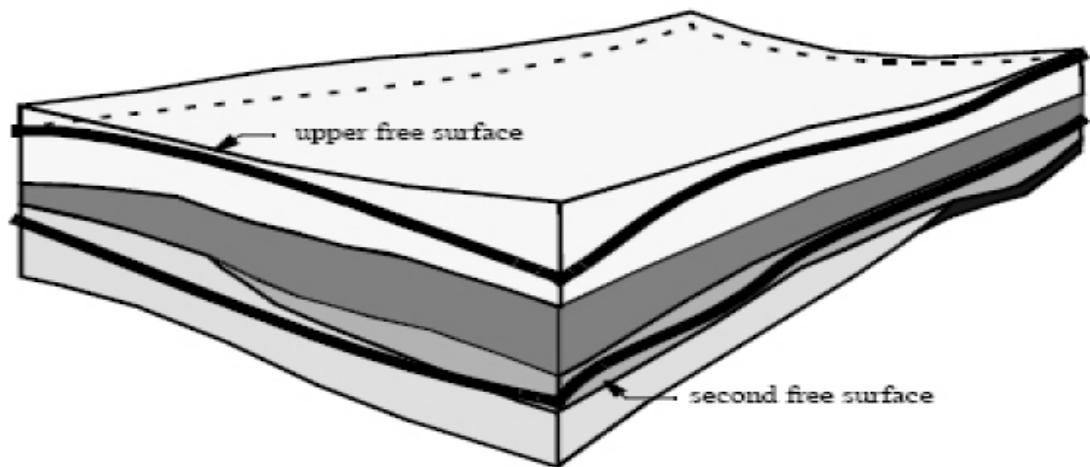


图4 三维含水层系统中的多自由表面

初始时刻 $t_0$ 时，地下水位位置较低，网格也相应地收缩。这时，下面的两层完全在 $K_3$ 地层内。但是，上层跨越 $K_2$ 和 $K_3$ 地层，这就要求采取特殊的处理方法。对与任意数目的地层交叉的单元，三维内插法允许适当插入数据以解决问题。在随后的 $t_2$ 时刻，自由水面又有了进一步的上升，不需任何插补，移动网格层片就能与给定的初始层片数据一致。

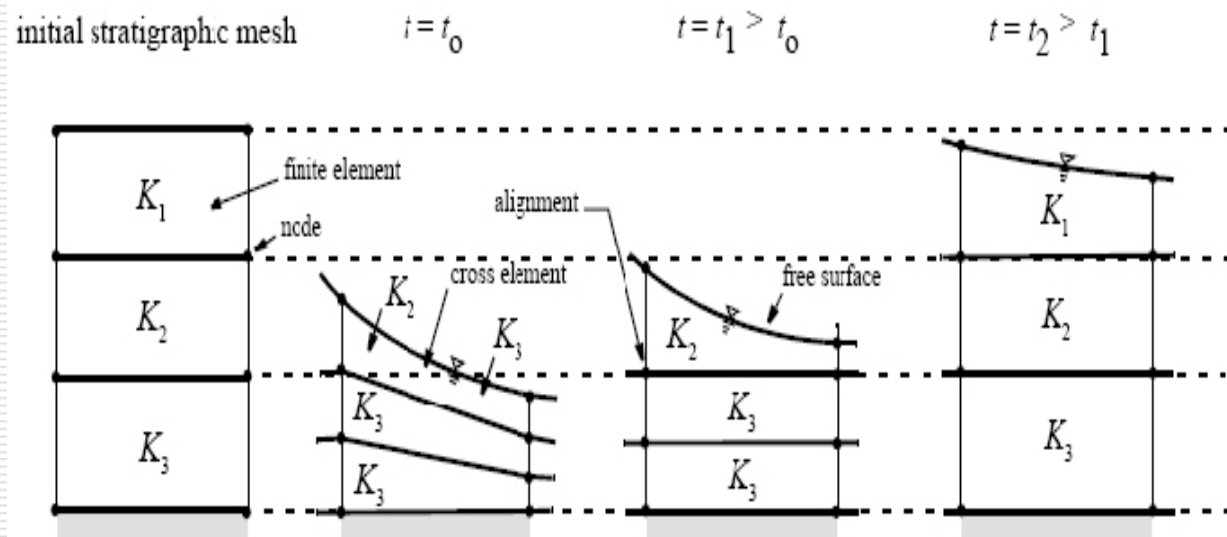


图5地下水位变化，含水层网格变化示意图

## 第三类混合边界处理

当河流在FEFLOW 中是作为第三类边界处理时，河流通过底积层和含水层发生水力联系(图6)。根据达西定律有(1)式:

$$q_n \approx - k_{o, in} \frac{\Delta h}{\Delta l} = - k_{o, in} \frac{h_R - h}{d}$$

式中:  $q_n$  为横截面法线上的交换量;  $k_{o, in}$  为河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  $\phi_{h, in} = \frac{k_{o, in}}{d}$  (当河流补给地下水时, 河流参数为  $\phi_{h, in}$ ; 当地下水补给河流时, 河流参数为  $\phi_{h, out}$ , 在FEFLOW 中可以分别指定这两个参数), 于是有(2)式

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

从(2) 式中看出, 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。

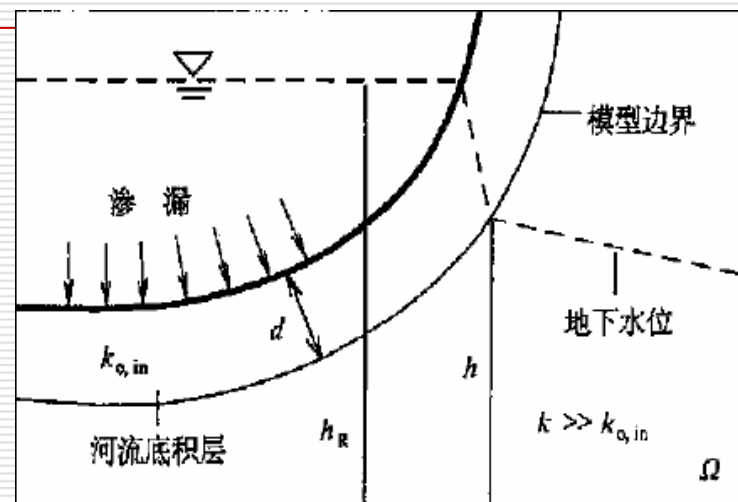
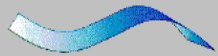


图6 河流横剖面示意图





Fig.3 Schematic cross section of a river

- 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  $k_{o, in}$  - 底积层渗透系数



## FEFLOW 水流边界条件

---

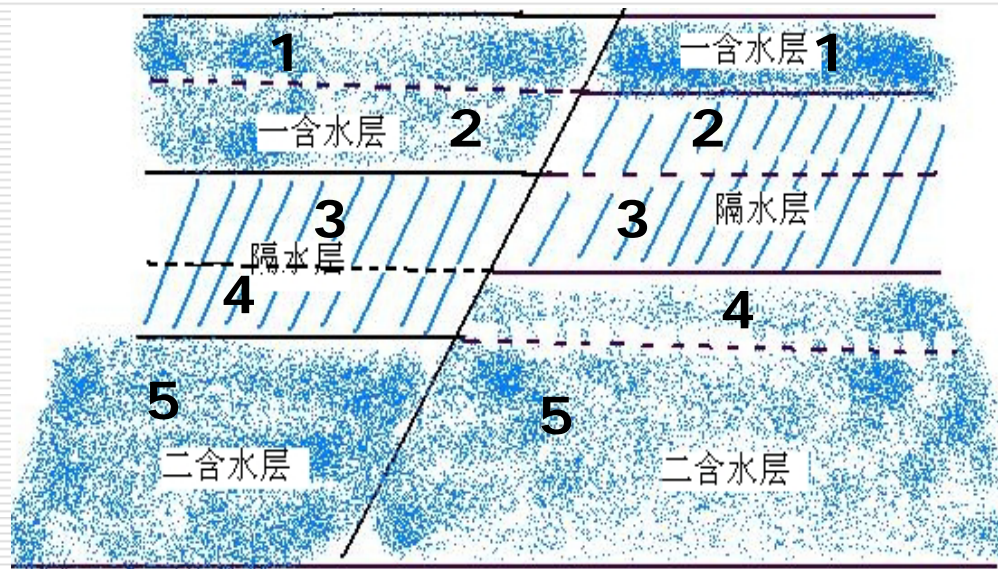
| sign  | Boundary condition           | geometry             | unit                     |
|---|------------------------------|----------------------|--------------------------|
|    | Head (dirichlet)             | node                 | m                        |
|    | Flux (Neumann)               | Line(2D)<br>Area(3D) | m <sup>2</sup> /d<br>m/d |
|    | Transfer (Cauchy)            | Area(3D)             | m                        |
|  | Well (singular point source) | node                 | m <sup>3</sup> /d        |

---



## 对断层或地层缺失的处理

断层是地层发生错位、岩性不连续的地质现象，是一种特殊的水文地质情况。目前为止，其它模拟软件都不能很好的处理断层现象，FEFLOW中采用的是虚拟含水层结构的方法。即将断层处的地层同相邻的地层虚拟连续起来，从而概化为多层。





## 时间步长控制

---

有限元法中，解非稳定流时用差分  $\frac{\Delta h}{\Delta t}$  代替实际水头关于时间的偏导数  $\frac{\partial h}{\partial t}$  这样带来了截断误差。一个问题是：当三角形单元无限细分，并且当  $\Delta t \rightarrow 0$  时，近似解是否趋于真解？另一个问题：在一个步长一个步长地计算时，误差会不会积累起来越来越变大？

因此为了解决求解收敛性与稳定性的问题，felow中结合了很多如 Galerkin, shock-capturing, full upwinding 等多种求解方法来控制模型时间步长。在这里面，注意的是，在水力坡度大的地方把单位加密些，并避免出现狭长三角形和顿角三角形；在水头变化较快的时段内把时间步长适当取小些，一般能保证近似解的误差在容许范围内。

---

## Feflow中运行模型时间长短的决定因素是什么？

---

影响模型运行快慢的因素主要是时间步长的设定，剖分网格的多少模型承载数据量的大小，归根到底就是数学模型的求解方程组的大小，此外计算机的内存大小也有一定影响，因此为了能在最短时间里得到最佳模拟结果，就要求很好地控制时间步长，这里我们可以根据feflow软件内嵌的解法自动控制时间步长 从而达到我们做不同类型模型的目的。

---

## Feflow中局部坐标和全局坐标的区别

---

客观模拟的含水层多为各向异性，即在空间某一点上不同方向上的含水层参数不同，在这种情况下，要求给出每个小单元的主导水系数与整体坐标系x轴之间夹角  $\theta$  于是建立了局部坐标系，这样使它与该单元导水系数的主方向共线，接下来要将每个单元导水矩阵叠加起来形成整体导水矩阵，因此需要将不同局部坐标系中给出的导数系数矩阵化为整体坐标系中的形式

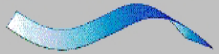
利用坐标系变换关系

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \cos \theta + y \sin \theta + x'_0 \\ y' &= -x \sin \theta + y \cos \theta + y'_0 \end{aligned} \right\}$$

形成整体导水矩阵并进一步形成最终的线性代数方程组。

---

FEFLOW



Finite Element subsurface FLOW system

---

谢 谢 !

---