

地下水流量场效应在数值法改进中的应用

目前, 国际地下水数值计算研究进展中, 已从传统的人机界面改善、功能模块与算法模块的扩展过渡到智能化处理方面, 如概念模型法、参数边界识别、排水沟流量模拟、边界条件转换等“域”变化处理方面。数值模型计算通过空间与时间离散化及对水量边界条件的假设概化实现了数值解算的实际应用, 但在理论推论过程中忽略了源汇项流量作用域效应的影响。本文从流量域特征分析出发, 指出数值模型中存在的缺陷, 提出改进处理的思路, 可一定程度提高模型仿真度。

一、流量作用域问题的引出

在数值法的有限元方法计算中, 以伽辽金方法 (Galerkin method) 为例, 基于对应泛函的变分原理, 将微分方程简化为线性方程组, 推导出有限元总渗透矩阵, 它是内水位迭代的重要程式, 总渗透矩阵解析式如下:

公式(1)

式中:

α —时间因子也称显隐因子, 与解法优化有关, 一般取 0~1;

$[G]$ —非边界单元渗透矩阵, 亦称系数矩阵;

$\{H^k\}$ — k 时刻水头矩阵;

$\{R^k\}$ — k 时刻垂向水交换量 (也称源汇项) 矩阵;

$\{F^k\}$ — k 时刻边界单元的流量矩阵;

$[C]$ —常数矩阵, 亦为储量变化矩阵;

k —为时刻;

Δt —为 $k \sim (k+1)$ 时刻间的时间长度。

公式 (1) 中的 $\{R\}$ 为计算单元垂向水交换量, 一般可表述为 $dQ=dW \cdot dF$, 侧向径流量 $\{F\}$ 亦类似。则自然流量边界的流量是由二部分组成, 第一部分为作用强度 (W), 代表单位过水断面上施加的流量, 第二部分为流量作用域代表流量作用的大小或范围 (F), 用以表征所在地下水系统与其它水体发生水量交换时, 流量的影响范围或作用范围。

在数值计算时, 常根据流量作用强度的变化相对划分出若干个流量时段, 并假定该时段内 W 值一定、 F 值不变, 因而有 $dQ=F \cdot W$, 则在 K 时刻到 $K+1$ 时刻的时段 (时间长度为 t) 计算中, 公式 (1) 则可化简为:

公式(2)

上述公式 (1) 到公式 (2) 的转化是以流量作用域 (F) 的变化可以忽略为概化前提的, 公式 (2) 是数值计算软件核心计算矩阵。实际上, 在以步长为最小时间单位的计算中流量作用域的变化与影响确实不大, 但对于一个均衡年或一个较长预测期来讲, 流量作用域累积变化不仅不可忽视而且可能产生水文地质条件突变, 例如预测期内由于开采量增大, 可以造

成潜水蒸发及自流范围的缩小甚至消失。而以往在数值模型计算中,认同这种理论忽略,采用流量作用域固定赋值,无法模拟湿地萎缩、溢出带退移及泉沟断流等自然现象。

因此,从尊重自然规律角度出发,在环境水文地质数值法计算中尽量不要将流量作用域作为常量处理。以往这种处理的好处在于计算机应用的初期简化了繁杂的计算过程,但代价是降低了模型预报仿真能力,并在预报中产生了偏离水文地质条件的现象。

二、流量作用域的形成特性

下面以地下水动力学中常见的完整井稳定流抽水试验及非稳定流试验为例,说明井流作用域的形成原理及主要特征。

在稳定流抽水试验中,当抽水达到近似稳定以后,流场中的任何要素(水位、水量、降深)都为常量,含水层中任一点的地下水运动方程为:

公式(3)

抽水激发产生降落漏斗,形成一个抽水影响域,影响域补给边界(类似孤岛)为 r ,影响域半径为 R ,影响域边界水头假设等于补给边界的水头(H_0);井中的出水量 Q_w 与同在 R 处的圆柱形过水截面的侧向流量(Q_r)相等,即可推导出裘布依公式(承压水为例):

公式(4)

在非稳定流中,假设含水层边界无限远且抽水量完全由储存量提供,则根据泰斯公式对降深 s 进行求导得到以下变形式:

公式(5)

当 r 一定, t 足够大时,

公式(6)

当 t 一定, r 足够大时,采用径向坐标对泰斯公式进行变形,则通过过水圆柱形的流量 Q_r 及边界流量 Q_r :

公式(7)

所以,在抽水试验的任何时刻,总能找到一个影响边界使 $Q_r \rightarrow Q_w$ 。稳定流抽水试验的边界是影响半径,非稳定流抽水试验的影响边界向含水层边界逐渐趋近。综上,只要有流量存在就一定会产生一个与其相关的作用域,不考虑短期储存量动用影响,汇入或流出边界的流量近似等于源汇点的流量。以此得到有关作用域的几个性质:

(1) 地下水源汇项存在一个对应的流量作用域;

- (2) 作用域边界的流量与源汇项流量相等 $Q_r=Q_w$;
- (3) 作用域范围受地下水位影响，是地下水位的函数。

三、流量作用域的分类

水体和水体间的作用须通过一过水截面或断面传递能量和水量，见表 1，根据流量作用域的形态可划分出三种类型（表 1）。潜水蒸发、泉水及侧向径流等自然流量的作用域均是直接作用方式，其流量作用域范围大小都与极限标高 H_d 及源汇点水位 H_w 有关。

例如，潜水蒸发是地下水天然排泄方式，当源汇单元地下水位高于极限潜水蒸发标高时，就形成面状排泄，相反时则断流；同样，当地下水位高于排水沟基面标高时，地下水沿沟排泄，反之则断流。直接作用方式下的源汇项作用域大小是 H_d 与 H_w 的函数，当源汇单元出现断流时会产生明显的流域作用域范围变化如湿地萎缩、泉水溢出带退移、自流区缩小等。

表 1 地下水自然流量作用域分类表

类型	作用方式	源汇项	计算公式
面状作用域	直接作用	越流补给、潜水蒸发(含沼泽)	$Q_w=W\cdot F, F=f(H_w-H_d), H_w\leq H_d$ 断流
	间接作用	降水及地表水入渗	$Q_w=\lambda\cdot W\cdot F$
线状作用域	直接作用	侧向径流、排(泉)水沟(管)	$Q_w=W\cdot F, F=f(H_w-H_d), H_w\leq H_d$ 断流
	间接作用	深埋带溪渠入渗	$Q_w=\lambda\cdot W\cdot F$
点状作用域	直接作用	注水井、单泉及自流井	$Q_w=W\cdot F, F=f(H_w-H_d), H_w\leq H_d$ 断流
	间接作用	渗水坑池	$Q_w=\lambda\cdot W\cdot F$

公式符号说明：

Q_w —边界单元的计算流量， H_d —零流量极限标高（有时为地面标高）， H_w —源汇点水头， W —单位面积的源汇强度， F —作用域面积， λ —折算系数。

四、在数值模型研究中的应用

域概念应用是数值法近期改版的最大亮点，如 VMOD Flex 的概念模拟法造就一个输入模块与 N 个不同空间尺度与不同剖分方法数值模型对应，WINPEST 的参数自动识别中采用新算法实现水文地质参数分区自动创建等，而本文涉及的流域作用域改进也只是域概念应用的内容之一。以下通过 Visual MODFLOW 地下水数值模拟商业软件最新改版为例，介绍三种类型自然流量作用域的实践应用经验。其中，二类流量边界的改进采用了有利于水力边界处理的作用域虚拟外延方法，潜水蒸发边界及排水沟边界改进采用了类似干—湿单元处理的作用域预判修正方法，受到广泛应用。

1. 二类流量边界（GHB 模块，线状作用域）

从数值模型软件的发展历史来看，该边界处理的变化是非常大的。早在 20 世纪 80 年代，由于国内计算机硬件及数值运用水平较低，国内普遍使用数值程序的核心部分为美国地调局公开模块，自编的输入模块中多将二类流量边界相应处理成隔水边界与垂向单宽流量 q 的结合，是与地下水位无关的常量。这种变相处理产生的主要问题就是侧向径流量不再具有自然属性；在模型预报过程中，操作者常常依赖以往经验手动尝试调整。

21 世纪初，根据众多水文地质应用者提出的问题，国外商业程序软件中的侧向径流边

界采用了 GHB 模块, 该模块能够仿真因为水位及水力坡度变化产生的边界侧向流量自动改变, 还原了这一边界的自然属性。改变的优点是实现了不完整水文地质单元 (包括行政区单元) 的数值计算, 并可任意指定水力边界, 缺点是带来了在模型预报中由于开采量增加等产生的额外激发补给, 以及不合理的水力边界可能同时增加水均衡总量的问题。

对于二类边界单元作用域, 近年来出现了一种新的修正方法, 即对流量作用域进行虚拟扩展。在二类流量边界单元外虚设一个水位恒定的补给源和足够距离长的补给途径, 使得在模型预报过程中几乎不会产生意外的激发补给, 同时由于补给源水位与边界单元水位间的巨大水位差不会产生补给边界单元中有排泄边界单元的情况, 圆满地解决了这类边界的概化困惑。这是一个流量作用域处理的最典型案例, 通过虚拟域手法实现了侧向径流量的自然属性回归, 保证了模型预报的安全。

2. 潜水蒸发边界 (EVT 模块, 面状作用域)

由于对流量作用域及流量自然属性的理解不深刻, 以往的数值模型常常对潜水蒸发量的流量作用域采用限定或恒定水位埋深的分区方法进行处理, 这在小区域单一的地下水资源评价或工程场地渗流问题处理时并没有太大的问题。但在区域范围较大的计算区域, 特别是开采规模较大、地下水位变幅很大、预报时间很长的情况下, 就无法解决地下水浅埋带移动的水文地质问题, 甚至带来很大的预报误差。

正是意识到这种常规处理的错误, 在某区地表引水对下游胡杨林的影响项目中, 通过胡杨林生长状态与地下水位的关系以及潜水蒸发作用域的可能变化分析, 利用 EVT 模块设置了预判修正, 实现了潜水蒸发量自动计算及潜水蒸发域变化自动分析的目的, 即: [1]以潜水位加上实测水位埋深为潜水层的顶面, 并对重点地带进行了高程加密; [2]考虑到地下水位逐渐下降的现实及未来胡杨林拯救工程可能造成的潜水蒸发域的变化, 圈定了一个未来的潜水蒸发区; [3]模型程序在运行过程中对单元的水位埋深变化进行重新计算, 并根据潜水蒸发极限深度进行判别, 确定是否是有效蒸发单元, [4]凡是确定为有效蒸发单元的, 则根据不同潜水埋深区间蒸发强度的赋值进行潜水蒸发量的计算。

3. 排水沟边界 (DRN 模块, 点状作用域)

这一程序模块最适合矿井疏干及排水 (泉水) 沟等的边界处理, 如果涉及有价值的单泉及自流井的水量衰变研究也可用之。

最早的排泄沟边界多被处理成类似河渠入渗的形式, 模型识别过程中的流量大小取决于经验赋值, 预报时多采用数理统计公式计算值。因而, 这种权宜处理方式失去了流量的自然属性并具有很强的人为性。

DRN 模块基于水量均衡 (Zone Budget) 计算原理, 选定对形成流量有贡献的相连单元组成流量作用域, 流量大小取决于域边界水头与排泄点的高差以及流量域的断面宽度与渗透性, 流量作用域的形状应为以排水沟为轴心的对称状。该模块流量方向具有惟一性, 并当域边界水头低于流量单元排泄高程时, 单元排泄水量为零。

在模型识别验证过程中, 除需进行两场水位识别 (一般指降速场和梯度场) 外, 应通过

PEST 模块及 Zone Budget 模块利用水量监测数据对初设流量参数进行自动识别修正。其好处在于模型预报时, DRN 模块不再有人工干涉, 流量预报的过程是自动完成的。

实际上, 在近年来国内大中型矿井涌水的勘察治理中, 常采用大型非稳定流注水试验, 测试出可能影响涌水的主要通道区域及流量边界, 利用类似 DRN 模块进行注水试验及涌水量识别, 实现未来开采条件下预测矿井涌水的目的。

五、结论

本文通过对数值模型有限元伽辽金解法(权剩余法)中总渗透矩阵的过程变换分析, 指出了数值法理论推导过程中存在的假设缺陷, 解决了流量边界的强度问题, 但忽略了流量作用域的变化, 相对于生态环境变迁研究存在较大缺陷。

模型边界流量一般是由流量强度和流量作用域两部分组成, 本文根据流域作用域形态差异可划分为三种作用域类型。通过对自然流量作用域的机理分析, 介绍了在最新数值计算中如何利用数值计算软件输入端进行人工智能干预, 实现数值计算过程对湿地萎缩、溢出带退移等自然现象的仿真处理。

本文指出, 在今后的水文地质工作中, 应当加强对自然流量完整属性的重视与研究, 不断提高各种流量作用域特征认识及概化能力, 更好地发挥数值计算的预报功能, 这对类似矿井涌水预测、地下水超采治理、湿地修复等环境水文地质研究具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] 朱学愚, 钱孝星, 刘新仁. 地下水资源评价[M]. 南京: 南京大学出版社, 1987.
- [2] 林学钰, 侯印伟, 邹立芝, 等. 地下水水量水质模拟及管理程序集[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1988.
- [3] 殷昌平, 孙庭芳, 金良玉, 等. 地下水水源地勘查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [4] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1999.
- [5] Nilson Guiguer. Waterloo hydrogeologic Visual MODFLOW User's Manual[M]. Ontario, Canada: Waterloo Hydrogeologic, Inc, 2014.
- [6] Nilson Guiguer. Waterloo hydrogeologic MODFLOW Packages Reference Manual[M]. Ontario, Canada: Waterloo Hydrogeologic, Inc, 2014.