

基于 GIS 的孔隙含水层系统三维空间离散方法研究

成晓东¹, 徐网谷², 陈锁忠²

(1. 浙江省金华市地质环境监测站, 浙江 金华 321001; 2. 南京师范大学 地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097)

[摘要] 分析了目前孔隙地下水流三维有限差分数值模拟中对含水层系统三维空间离散存在的问题, 针对自然界孔隙含水层与隔水层空间分布的不连续性与厚度的不均匀性, 研究了基于 GIS 的孔隙含水层系统三维空间离散实现的技术路线, 提出了基于 GIS 与不规则六面体元的孔隙含水层系统的三维空间离散方法, 最大限度地保证了离散体元中含水层类型的单一性, 提高了孔隙地下水流模拟模型三维空间离散的精度。

[关键词] 三维空间离散, 不规则六面体, GIS, 孔隙含水层系统

[中图分类号] P641.136, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292(2004-04-0043-04)

0 引言

随着计算机技术的发展, 地下水流模拟模型已从一维模型发展到目前的三维模型, 模型的解也相应地从解析解过渡到现在的数值解^[1]。在地下水流数值模拟过程中, 必须涉及到对含水层的空间离散。地下水流的二维数值模拟, 只考虑地下水流的水平运动, 模拟的对象是单个含水层, 含水层的空间离散也只是水平方向。地下水流的三维数值模拟过程中, 既有地下水流的水平运动, 也有地下水流的垂直运动, 并将含水层与隔水层视为同一个地下水含水系统, 含水层与隔水层之间通过垂向渗透系数实现水量和能量的交换。模拟过程中, 含水层与隔水层的空间离散不仅需要水平方向的空间离散, 还需进行垂向空间离散。

孔隙含水层系统的三维空间离散是将含水层与隔水层离散成若干个多面体元, 针对单个多面体元给模型计算参数赋值。为此, 孔隙含水层系统三维空间离散精度的高低将直接影响模拟结果的精度, 好的离散方法不仅能提高模型的离散精度, 而且还能便捷与准确地给计算参数赋值, 从而提高模型的模拟精度。本文针对孔隙含水层系统空间分布特征, 分析了目前地下水流三维有限差分数值模拟中空间离散方法存在的问题, 对孔隙含水层三维空间离散方法进行深入研究, 提出了基于不规则六面体元的孔隙含水层系统的三维空间离散方法。

1 孔隙含水层系统的空间分布特征

孔隙含水层系统大多形成于第四纪, 其形成环

境的变迁直接影响了孔隙含水层系统空间分布特征。第四纪以来, 由于气候和海面突变, 第四纪地层的沉积环境相应发生变化, 加上受局部区域地表水动力条件改变的影响, 导致第四纪地层的结构、岩性、沉积类型等方面在水平和垂向上的分布存在着较大的差异。相应地, 分布于其中的孔隙水含水层在空间上的分布也存在较大的差异。虽然孔隙水含水层总体上呈层状分布的, 但是各层在区域上分布极不均匀, 在某一区域, 有的层尖灭, 有的层厚度空间分布不一致。由于孔隙水含水层空间分布的不均匀性, 给空间离散带来了困难, 特别是在垂向空间离散时, 如果不考虑其空间分布不均匀的特点, 某些空间离散的单个体元中存在多个孔隙水含水层, 则计算参数的赋值精度受到严重影响, 同时也降低了模型的模拟精度。

2 目前地下水流三维有限差分数值模拟中常用的空间离散方法

目前, 地下水流三维有限差分数值模拟中, 孔隙含水层系统垂向上的空间离散大多数采用规则矩形格网的剖分方法, 其中最为典型的是由美国地质调查局(U S Geological Survey 组织开发的 MODFLOW 三维有限差分地下水渗流模型^[2,3], 这种空间离散方法是将模拟区域的孔隙含水层与隔水层视为同一个地下水含水系统, 在确定水平空间的网格的基础上(ΔX 与 ΔY , 再定义含水层系统的垂向空间离散的步长(ΔZ , 根据含水层系统的厚度与 ΔZ 计算垂向空间离散的层数 n , 并以 n 个水平面在垂向上剖切含水层与隔水层, 形成模拟区域含

水层系统的三维空间规则六面体元(长方体或正方体)离散格网,如图 1 所示.

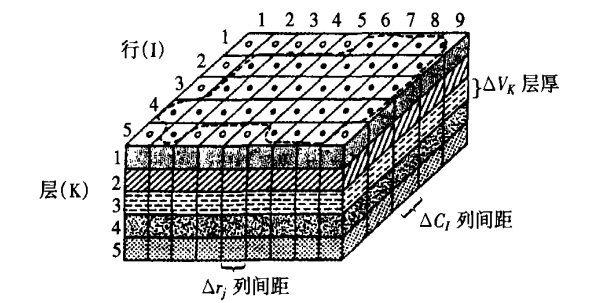


图 1 规则矩形格网三维空间离散示意图

该离散方法中,为了使离散的规则六面体元中含水层或隔水层的类型尽可能保证单一性,在垂向空间离散时采用减小离散步长 ΔZ , 增加离散层数 n 方法,以便最大程度地达到剖分的目的.

3 规则六面体元空间离散存在的问题

利用规则六面体元对孔隙含水层系统进行三维空间离散,虽然采取了一定的措施尽量保证单个体元中孔隙水含水层或隔水层类型的单一性,但由于自然界中孔隙含水层或隔水层空间分布极不均匀,每个含水层或隔水层的分布范围与厚度在区域上存在差异,而且每个孔隙含水层或隔水层的顶底面大多为曲面,以规则的六面体元空间进行离散,将不可避免地出现一些体元中存在多个含水层或多个隔水层或含水层与隔水层两者并存,如图 2 所示.

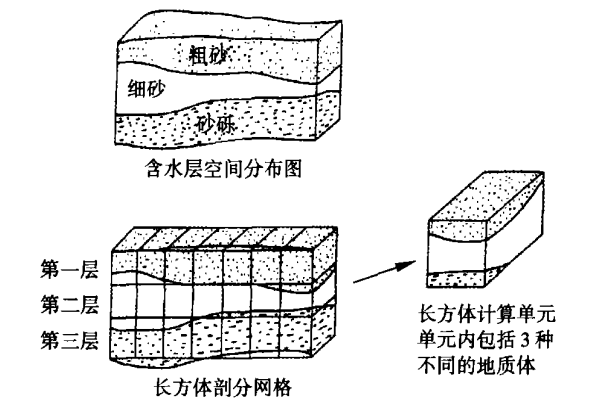


图 2 单个六面体元含水层与隔水层类型多元性示意图

受组成含水层与隔水层岩性、沉积类型等因素的影响,各个含水层与隔水层的水文地质计算参数都不一样.若一个体元中存在多个含水层或多个隔水层,模拟计算时,该体元的每个水文地质参数值应是多个含水层或隔水层或含水层与隔水层并存的相应参数的综合值.然而,水文地质参数值都是按单个含水层或隔水层通过各类水文地质试验获取的,单个体元中各个水文地质参数的综合值无法

取得.因此,体元中各个水文地质参数的精确赋值存在困难,水文地质专业人员只能根据经验估计参数值,导致模型的模拟精度降低.此外,如果利用减小垂向空间离散步长 ΔZ 降低上述空间离散方法造成的误差,空间离散的模型层数则增多,为模拟准备的各类数据文件将成倍增加,相应的计算工作量则以指数形式增长,而且一些体元中仍然存在二个或二个以上类型含水层或隔水层,或者含水层与隔水层并存,没有实际解决单个体元中存在多个含水层或隔水层,或者含水层与隔水层并存的问题.

4 不规则六面体元空间离散的特点

根据自然界中孔隙含水层与隔水层的空间分布特征,如要保证每个空间离散的六面体元中的含水层或隔水层类型的唯一性,必须使六面体的上下界面都处于同一个含水层或隔水层中.受该条件的限制,规则六面体元的空间离散则不可能达到此要求,需要采用不规则六面体元进行空间离散.

论文中提出的不规则六面体元是指上、下界面为曲面、侧面为平面的六面体元,上、下界面的曲度与起伏方向理论上与某个含水层或隔水层的上下界面的一致(如图 3 所示;对于研究区域不连续分布的含水层与隔水层,地层尖灭位置可能是一条曲线或者是一个点,相应地分布于地层尖灭位置六面体元的侧面则为曲线或者点,即以线或点代替面(如图 4 所示).

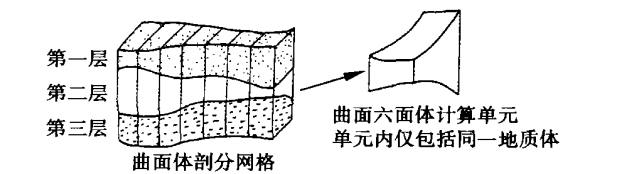


图 3 不规则六面体元空间离散示意图

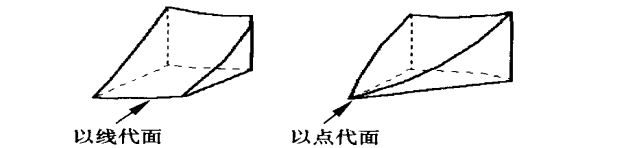


图 4 含水层或隔水层尖灭位置的不规则六面体元示意图

5 基于 GIS 的不规则六面体空间离散的技术路线

孔隙含水层与隔水层空间分布的重要特点之一是其具有区域性,对于区域性分布的含水层与隔水层,若采用不规则六面体对其进行空间离散,仅依靠手工方法实现存在较大的难度,特别是对各个含水

层或隔水层顶、底面各个离散点高程提取存在困难, 需要借助 GIS 的空间分析功能才能完成, 具体的技术路线如图 5 所示. 即首先根据区域水文地质条件, 对模拟区域内每个控制性水文地质钻孔中各个含水层与隔水层进行标准化划分, 给每一层赋予特定的 ID 号, 并建立控制性水文地质数据库. 其次, 从控制性水文地质钻孔数据库中读取各个含水层与隔水层顶底界的高程数据, 利用 GIS 专题制图的功能, 自动绘制每一个含水层与隔水层的顶底板高程等值线图, 并以矢量图形的文件储存. 第三, 在水平上利用矩形网格对模拟区域进行空间离散, 形成平面空间离散网格图, 调取每一层的顶底板高程等值线图并与水平空间离散网格叠加, 按一定的算法将等值线栅格化, 实现矢量数据与栅格数据的转化, 自动读取网格中心结点上每一含水层与隔水层的顶底板高程数据, 形成矩阵形式的数据文件并保存, 供模型计算调用. 第四, 如果仅要求每一含水层与隔水层厚度作为垂向空间离散的步长, 则空间离散和每个中心结点的高程数据文件形成同第三步; 如要求对某一水文地质层进一步剖分, 则需读取剖分目的层中心结点上的顶底板的高程数据, 计算每一结点上的地层厚度 ΔZ_i , 定义剖分的层数 n , 获取剖分的空间步长 $\Delta Z_i/n$ (如图 6 所示, 计算剖分层每个格网中心结点高程值, 形成相应的矩阵数据文件.

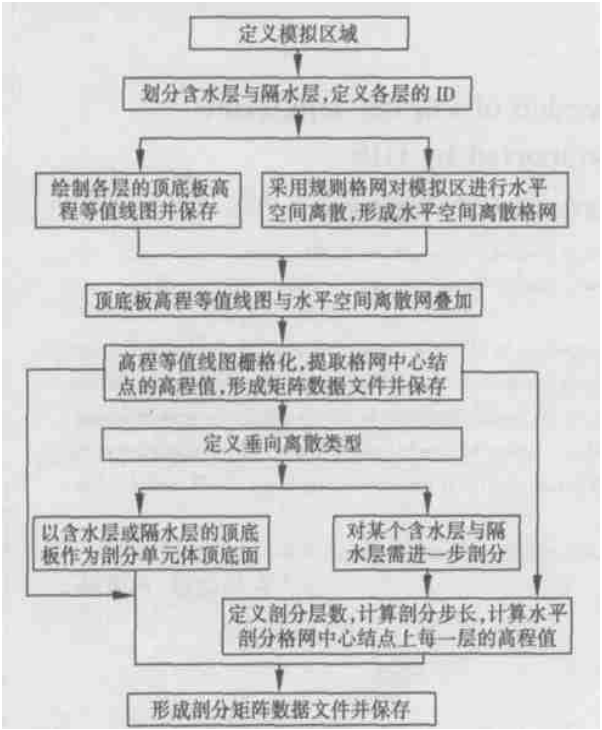


图 5 孔隙含水层与隔水层垂向空间离散技术路线图

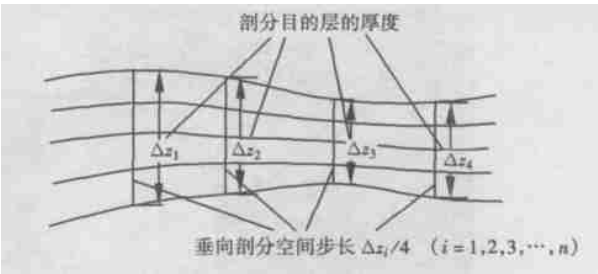


图 6 单个含水层与隔水层垂向空间离散图

6 基于 GIS 的不规则六面体空间离散实现

基于 GIS 的不规则六面体的孔隙含水层系统空间离散分两个部分实现, 即平面矩形格网的自动生成和垂向不规则格网的生成. 其中平面矩形格网的自动生成可在计算机界面上实现, 实现过程为: 调用研究区的基础地理信息、坐标原点定义、剖分空间步长 ($\Delta X, \Delta Y$ 定义与格网生成. 垂向空间离散则在后台实现, 计算界面只显示剖分条件的对话框, 待剖分条件输入及确定后, 则自动生成垂向空间离散格网, 并形成相应格式的数据文件. 其实现过程为: 以平面矩形格网离散为基础, 根据研究区水文地质条件的概念模型定义剖分层数, 然后调用各个含水层和隔水层的顶底板高程等值线图, 提取平面矩形格网中心结点上的顶底板高程, 再定义每一层需进一步剖分的层数并确定, 则生成满足剖分条件的不规则六面体的空间离散格网. 基于 GIS 的不规则六面体空间离散的实现如图 7 所示.

7 结语

受沉积环境的影响, 孔隙含水层与隔水层在空间上分布具有不连续性、厚度的不均匀性与地层顶底界面几何形状的不确定性. 针对其空间分布特性, 可利用 GIS 的空间分析与数据的自动采集功能, 采用不规则六面体对其进行三维空间离散, 一方面能最大限度地保证不规则六面体元中含水层与隔水层类型的单一性, 提高水文地质模型三维空间离散与水文地质计算参数赋值的精度, 另一方面可大大减少水文地质模型空间离散的工作量, 缩短地下水流模拟所需的时间, 提高地下水流模拟的时效性. 通过含水层系统三维空间离散与地下水流的三维模拟, 可从三维空间揭示特定开采方案下地下水流的流场, 以及地下水位降落漏斗的空间分布特征, 为区域地下水资源的合理开发利用提供依据.



图 7 基于 GIS 不规则六面体网格剖分图

[参考文献]

[1] 郭卫星,卢国平译. MODFLOW 三维有限差分地下水流模型[M]. 南京:南京大学出版社, 1998.

[2] McDonald M G, Harbaugh A W. Modular Three- Dimensional Finite- Diffeerence Groundwater Flow Model[Z]. USA Geological Survey, 1996. 35 - 60.

[3] 孙纳正. 地下水流数学模型与数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.

[4] 武强,董东林, 武钢, 等. 水资源评价的可视化专业软件(Visual Modflow 与应用潜力[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5 : 21 - 23.

[5] 陈锁忠, 马千程. 苏锡常地区 GIS 与地下水开采及地面沉降模型系统集成分析[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5 : 8 - 10, 13.

Research on 3D Spatial Dispersion of Porous Aquiferous Stratum System Supported by GIS

CHENG Xiaodong¹, XU Wanggu², CHEN Suozhong²

(1. Jinhua Geological Environment Monitoring Station of Zhejiang Province, Jinhua 321001, China;
2. Jiangsu Provincial Key Lab of Geographic Information Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

Abstract: By analyzing the problem of hydrological 3D spatial dispersion in 3D finite differential numeric simulation of porous groundwater flow, as well as discontinuous spatial distribution and asymmetric thickness of porous aquiferous strata and partitive groundwater stratum, the paper presents the GIS-based technique of 3D spatial dispersion of porous aquiferous stratum system. Besides, the paper puts forward the 3D spatial dispersion method of irregular hexahedral unit based on GIS to guarantee to the greatest degree the uniqueness of the stratum types among the dispersed units and improve the precision of 3D spatial dispersion.

Key words: 3D spatial dispersion, irregular hexahedral unit, GIS, porous aquiferous stratum system

[责任编辑: 严海琳]