

基于 AquiferTest 与 Matlab 耦合的水文地质参数求解

师永丽, 张永波, 张志祥

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对传统水文地质参数求解方法存在限制较多、工作繁琐、精度不高且不能直观反映出抽水的流场变化等缺点, 以山西大佛寺煤矿抽水试验数据为基础, 利用 AquiferTest 和 Matlab 建立模型, 提出一种计算水文地质参数的新方法, 最终所得水位预测值与实测值相近, 结果可靠, 可见该方法求解出的水文地质参数更加符合工程实际情况。

关键词: AquiferTest; Matlab; 抽水试验; 水文地质参数

中图分类号: P641.73

文献标志码: A

1 引言

抽水试验常被用来获得导水系数 T 、渗透系数 K 和贮水系数 S 等水文地质参数, 其理论基础为地下水井流理论^[1]。工作中应根据具体工程条件和精度需要, 综合考虑含水层、井、流态以及观测孔布置情况来设计抽水试验。以往人工处理稳定流抽水试验多用公式法求参, 非稳定流抽水试验用配线法和 Jacob 直线图解法求参^[2], 但二者的计算量大、方法限制条件较多。随着计算机的发展, 计算机求参与水文地质数值模拟仿真得到了广泛应用^[3]。其中, 含水层试验软件是专门用于抽水试验资料分析、数据处理的图形化研究的软件^[4]。它比人工计算更加快捷方便, 有多种求解水文地质参数的方法, 包括 Theis 公式、Cooper-Jacob 时间降深公式、Cooper-Jacob 距离降深公式、Theis 阶梯流量公式、Cooper-Jacob 阶梯流量公式、Theis 水位恢复法、Hantush-Bierschenk 井损法等 14 种方法^[4]。用户可以通过 Pumping Test、Discharge、Select、Analysis、Site plan、Reports 等一系列顺序指令求解水文地质参数。但该软件简化了许多工程因素, 计算结果为理想条件下的各参数取值, 工程实用性较小^[5]。Matlab PDE 偏微分方程工具箱具有强大的求解偏微分方程的功能和仿真效果, 因此将其与 AquiferTest 相结合

可以得到符合要求的参数值。本文以山西省介休大佛寺旺源煤矿承压非稳定流抽水试验数据为基础, 利用 AquiferTest 的 Theis 配线法计算出理想状态下相关水文地质参数, 以所得参数值为初值, 应用 Matlab PDE 工具箱对抽水试验进行了三维仿真模拟, 得到地下水降落漏斗图和降深梯度图, 通过模型识别和实测数据拟合, 对模型初始水文地质参数进行校核修正, 获得了具有工程实用价值的水文地质参数值。

2 水文地质条件

2.1 区域水文地质条件

大佛寺旺源煤矿位于沁水煤田西缘、洪山泉域西段北边界, 属黄河流域汾河水系。控制该区岩溶水补给与排泄的构造包括化家窑地垒和绵山山前断裂带。岩溶水盆地中, 含水介质由寒武系中、上统及奥陶系中统碳酸盐岩组成多层系统, 由于断层切割, 成为统一的含水系统。岩溶地下水在盆地南部接受补给后以绵山为中脊向东西两侧运动, 然后再向北汇合; 在东部靠近奥陶系中统碳酸盐岩与石炭—二叠系煤系地层交界线附近形成强径流带, 在西部靠近大断层处也形成强径流带, 两径流带在洪山泉口汇合, 到洪山泉口附近受到化家窑地垒北断层上盘石炭、二叠系地层阻挡, 产生地下壅水, 溢出地表成泉。水文地质图见图 1。

收稿日期: 2014-11-08, 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2014011001-2)

作者简介: 师永丽(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源, E-mail: 454083195@qq.com

通讯作者: 张永波(1962-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为水资源与水环境、环境岩土工程等, E-mail: ty_zyb@sina.com

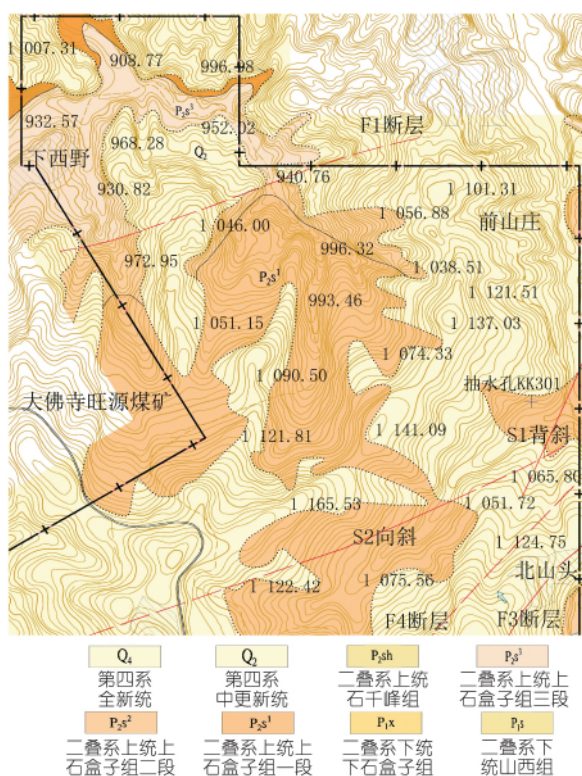


图 1 水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map

井田地层出露有奥陶系碳酸盐岩、石炭系碎屑岩夹碳酸盐岩、二叠系和三叠系碎屑岩以及第四系的风积、冲洪积物。井田含水层主要有奥陶系中统峰峰组、上马家沟组和下马家沟组碳酸盐岩裂隙、岩溶含水层,含水层富水性较好,岩性为厚层状海相石灰岩,主要成分为碳酸钙,因其易被水侵蚀溶解,构成了较好的储水空间,在深部溶洞、裂隙十分发育,甚至部分地方可使上部岩层塌陷而成柱状陷落,是矿井主要突水水源之一。

2.2 抽水试验情况

利用 ZKK301 号钻孔进行单孔抽水试验,钻孔位于井田北侧,抽水含水层段为奥陶系中统峰峰组。试验钻孔半径为 0.055 m,进行了预抽水 and 3 次不同降深抽水,每次抽水结束后水位均恢复到抽水前静止水位。第 1 次抽水水位降深为 63.1 m,单位涌水量为 0.052 L/(s·m),稳定流量为 83.376 m³/d,持续时间为 1 680 min,稳定时间为 1 440 min;第 2 次抽水水位降深为 41.95 m,单位涌水量为 0.000 43 L/(s·m),稳定流量为 14.688 m³/d,持续时间为 720 min,稳定时间为 540 min;第 3 次抽水水位降深为 21.2 m,单位涌水量为 0.000 7 L/(s·m),稳定流量为 1.209 6 m³/d,持续时间为 720 min,稳定时间为 540 min。

3 求解初始水文地质参数

3.1 人工求解

人工求解水文地质参数常用 Theis 曲线法,根据抽水试验数据在双坐标网格纸上画出降深 s 与时间 t 的关系曲线,手动与井函数曲线进行拟合,移动不断降深曲线使 2 条曲线拟合到最佳位置^[6],将拟合点数据代入 Theis 公式,求出水文地质参数(见表 1)。

表 1 KK301 抽水孔抽水试验计算参数对照表

Tab. 1 Pumping test calculation parameters table of KK301

求参方法	试验次数	导水系数 T /(m ² ·d ⁻¹)	渗透系数 K /(m·d ⁻¹)	贮水系数 S
AquiferTest	第 1 次	1.62×10^0	1.78×10^{-2}	2.21×10^{-4}
	第 2 次	5.05×10^{-1}	5.55×10^{-3}	7.65×10^{-4}
	第 3 次	4.32×10^{-1}	4.75×10^{-3}	6.75×10^{-4}
	平均值	8.52×10^{-1}	9.37×10^{-3}	5.54×10^{-4}
人工		8.42×10^{-1}	9.25×10^{-3}	5.63×10^{-4}

3.2 AquiferTest 求解

步骤 1 利用 AquiferTest 中的 Pumping test 设置 3 个抽水井(1、2、3)且每次只有 1 个井处于激活状态,来模拟 3 次抽水试验,同时在软件操作界面设置各水井的抽水时间以及主要参数,本文主要有钻孔半径 $R=0.055$ m、滤水管长度 $L=1.02$ m 和井的内半径 $r=0.05$ m 三个参数。

步骤 2 利用 Discharge 模块设置抽水井稳定时流量和静止时水位,并且导入水井观测数据和稳定时抽水井流量。

步骤 3 在 Analysis 模块中点击时间—降深分析获得水位降深曲线。

步骤 4 选择 Theis 分析法进行曲线的自动拟合,为了减小含水层边界等因素对结果的影响,可以选择下降段进行拟合,利用专业知识移动曲线,使曲线达到自动拟合与人工拟合的最佳位置。

3 次降深拟合曲线见图 2,所得水文地质参数见表 1。由表 1 可看出,人工求解与 AquiferTest 的 T 、 K 、 S 的误差分别为 1.118%、1.297%、1.598%,可见求解结果比较一致,误差较小。

4 基于 Matlab 的水文参数修正

以 AquiferTest 计算结果作为初值建立 Matlab 模型。

4.1 基本方程及边界条件概化

4.1.1 基本方程

求解抛物线方程是 Matlab PDE 工具箱的功能之一,其基本形式^[7]为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \nabla \cdot (\beta \nabla \phi) + \alpha \phi = \gamma \quad \phi \in \Omega \quad (1)$$

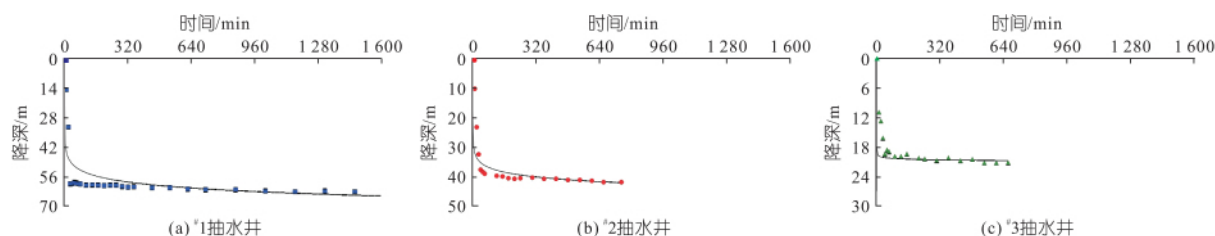


图2 Theis 匹配后抽水曲线

Fig. 2 Improved Theis plot of pumping

式中, ϕ 为未知函数; α, β, γ 均为与时间有关的实函数或复函数; Ω 为平面区域。

本次试验中 KK301 钻孔抽水试验属于承压含水层完整井非稳定流抽水模型, 而研究区地质构造简单, 地层平缓, 地下水流从空间上看是以水平运动为主、垂向运动为辅, 参数随空间变化不大, 体现了系统的均质性, 因此假设含水层为均质各向同性且水平等厚, 则微分方程^[8]为:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

式中, h 为水头函数; t 为时间。

可见本文求解方程满足抛物线型方程的形式和要求。

4.1.2 边界条件概化

PDE 工具箱中边界条件包括 Dirichlet 边界条件 $\tau\phi = \omega$ 、Neumann 边界条件 $\vec{n} \cdot (\xi \nabla \phi) + \lambda\phi = \delta$ 以及上述 2 种边界条件的混合边界 ($\vec{n}$ 为 $\partial\Omega$ 上的单位外法向量; $\tau, \omega, \lambda, \delta$ 分别为 $\partial\Omega$ 上的函数)。

井田北部的 F1 为一区域断层, 自下西野村南延入井田北西边界, 至后山庄村西南延伸出井田北边界, 向东北方向延伸, 倾角为 70° , 上盘为二叠系上统石千峰组、上石盒子组, 下盘为二叠系上统上石盒子组, 落差约 100 m。断层上盘 9、10、11 号煤层与断层下盘奥陶系地层接触, 构成不透水边界, 即概化为补给量为 0 的流量边界, 东西边界在洪山泉域径流带, 为已知流量的边界, 南侧为洪山泉边界, 属于已知水头边界。最终流量边界概化为 Neumann 边界; 水头边界概化为 Dirichlet 边界。边界条件见图 1。

4.2 流场方程的 PDE 求解

步骤 1 设置区域 Ω 和边界条件。以 (100, 100) 为圆心, 在 Set Formula 中输入 C1-C2 构造漏斗范围区域。切换到 Boundary Mode, 在 BoundaryCodations 对话框中设置边界条件, 北部设置为 Neumann 边界 ($\lambda = 0, \delta = 0$), 东部和西部边界也是 Neumann 边界 ($\lambda = 1, \delta = 166.5$), 南部设置为齐次 Dirichlet 边界 ($\tau = 1, \omega = 85$)。

步骤 2 设置方程参数。在 PDE Mode 模块

中打开 PDE specification, 选择 parabolic 方程, $\beta, \alpha, \gamma, \eta$ 分别设为 1、0、0、0.000 136 4。

步骤 3 网格及时间设置。在 Initialize/Refine mesh 中剖分和加密网格, 本模型加密 2 次, 见图 3。由于 Matlab 可以动态显示流场随时间变化过程, 故在 Time 选项中时间设置为水位稳定的时刻, 即 0:19 200, Relative/Absolute tolerance 均设置为 0.001。PDE 网格剖分图见图 3。

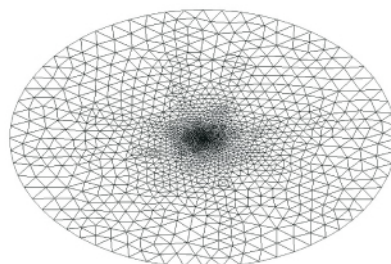


图3 PDE 网格剖分图

Fig. 3 PDE meshing map

步骤 4 模型识别和参数矫正。利用 Matlab 和第 1 次抽水实测数据对上述 Matlab 建立模型进行检验, 采用试错法进行模型识别, 最终获得水位降深与实测降深对比曲线见图 4。

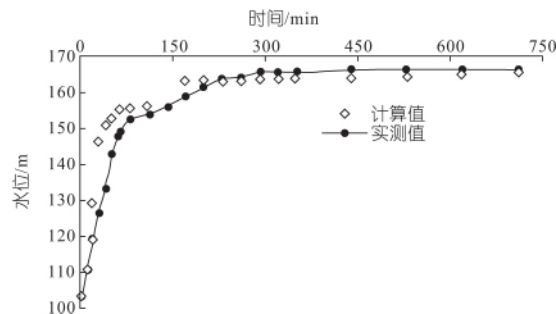


图4 KK301 第 1 次抽水过程拟合线

Fig. 4 Process fitting line of first pumping of KK301

步骤 5 求解 PDE 方程画出降落漏斗及矢量图。在 Solve Mode 中使用 plot 或 3-D plot 等函数, 显示 Contour 和 Height 画出相应抽水降落漏斗及降深梯度图, 见图 5、6。

由图 4 可看出, 计算水位降深较小, 与抽水试验第 1 次抽水数据误差在 ± 2.5 m 的占 85% 以上, 说明渗透系数偏小, 而其降深速率较大, 说明贮水系数偏大。但由于试验也存在一定误差, 且

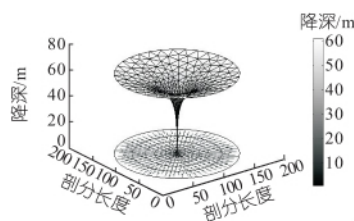


图 5 抽水稳定后水位降落漏斗图

Fig. 5 Water landing funnel plot at the stable time

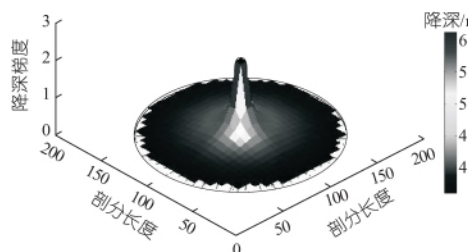


图 6 降落漏斗矢量图

Fig. 6 Vector of water landing funnel plot

计算值与实测数据误差在可接受范围内,所以模型基本准确。最终获得所测奥陶峰峰组水文地质参数分别为 $T=8.47 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{d}$, $K=9.31 \times 10^{-3} \text{ m/d}$, $S=5.72 \times 10^{-4}$ 。图 5 表明水位降落到 320 min 时,水位已趋于稳定,稳定时降落漏斗影响半径为 82.38 m,其与实际计算结果之间的误差为 1.04%,可见与实际抽水情况比较一致。由图 6 可看出,抽水井中心降深梯度最大,水位下降最快,是漏斗边缘的 2.75 倍。

5 结论

a. 利用 AquiferTest 的 Theis 配线法和人工配线法处理大佛寺煤矿抽水试验数据,发现 AquiferTest 计算的 T 和 K 略大于人工计算, S 略小一些,但 AquiferTest 工作量较小,效率更高。

b. 由于 AquiferTest 和人工配线法计算出的

参数均为理想状态下的含水层水文地质参数,在实际工程中应用会受到限制,实际工程中需考虑地下水初始降落漏斗、人工补给和开采等因素对含水层的影响,故采用 Matlab 建立模型,以实测数据验证模型,对 AquiferTest 计算的水文地质参数进行改进,使其更加具有工程实用性。

c. 抽水井中心降深梯度最大,水位下降最快,到 320 min 时,水位已趋于稳定,稳定时降落漏斗影响半径为 82.38 m,这与实际计算结果的误差较小,符合实际情况。

参考文献:

- [1] 蒋辉. 基于 AquiferTest 的抽水试验参数计算方法分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 35-38.
- [2] 陶宗涛, 闫志为. 基于 AquiferTest 的水文地质参数计算方法研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(12): 25-27.
- [3] YUAN Yirang. Characteristic Finite Difference Alternating-Direction Method and Analysis for Numerical Reservoir Simulation[J]. Acta Mathematica Scientia, 2000, 20(1): 1-9.
- [4] 龚雯, 卢巧梅, 张会明, 等. 利用 AquiferTest 预测抽水井对观测井影响的可行性研究[J]. 四川地质学报, 2011, 31(S1): 25-27.
- [5] 韩其婷, 刘建刚, 侯保升. 基于 AquiferTest 和 FE-FLOW 求解水文地质参数[J]. 工程勘察, 2014(10): 32-35.
- [6] 陶宗涛, 闫志为. AquiferTest 软件求解承压含水层水文地质参数的方法及效果[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 58-60.
- [7] 张敏. MATLAB PDE 工具箱在地下水问题中的应用[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [8] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.

Hydrogeological Parameters Solution Based on AquiferTest and Matlab

SHI Yong-li, ZHANG Yong-bo, ZHANG Zhi-xiang

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to overcome the limitations of the traditional method for solving hydrogeological parameters, such as more tedious, less accuracy and not directly reflecting the pumping flow field change, based on the pumping test data of Dafosi Coal Mine in Shanxi Province, the article proposes a new model for solving the hydrogeological parameters by using AquiferTest and Matlab software. The predicted water level is close to the measured water level. So, the hydrogeological parameters obtained by the proposed method are reliable and it is more consistent with actual situation.

Key words: AquiferTest; Matlab; pumping test; hydrogeological parameters