

基于抽水试验的遗传算法确定含水层参数的研究

贾德彬¹, 朝伦巴根¹, 高瑞忠¹, 朱仲元¹, 柴建华²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;

2. 内蒙古水利科学研究院, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要: 以潜水完整井流理论为基础, 以“京蒙沙源区植被建设中水资源优化配置研究”项目实施地点进行的潜水完整井定流量抽水试验资料为依托, 研究了基于抽水试验的遗传算法确定孔隙潜水含水层导水系数 T 、贮水系数 μ^* 以及重力给水度 μ 等参数的方法和途径, 取得了良好的效果。

关键词: 潜水含水层; 定流量抽水; 水文地质参数; 遗传算法

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

Abstract: Depending on the pumping theory of fully penetrating well, the phreatic aquifer parameters: conductivity T , storage coefficient μ^* and mining yields μ are efficiently determined by Genetic Algorithm based on pumping tests, which were carried out in the key research program “Scientific Allocation of Water Resources for Ecological Construction in Beijing and Inner Mongolia”.

Key words: phreatic aquifer; pumping with constant rate; hydrogeological parameter; genetic algorithm

利用潜水完整井定流量抽水试验资料确定潜水含水层导水系数 T (或渗透系数 $K = T/H$)、贮水系数 μ^* 以及重力给水度 μ 的常规方法有配线法、直线图解法和恢复水位法等。采用配线法时实测降深曲线与承压含水层完整井定流量抽水的 $W(u) - u$ 标准曲线 (泰斯)、无压含水层完整井定流量抽水的 $W(u_a, \gamma, r/d) - 1/u_a$ (或 $1/u_r$) 标准曲线 (博尔顿)、无压含水层完整井定流量抽水的 $S_d - t$ (或 t_s) 标准曲线 (纽曼) 的配线过程中因人而异的随意性很大, 这在水文地质求逆中非常忌讳的问题。遗传算法是模拟生物界的遗传和进化过程建立的 1 种通过概率搜索实现全局优化的搜索算法, 对非线性问题的寻优十分有效。因此本研究利用了遗传算法上述特性探讨了基于抽水试验的遗传算法确定孔隙潜水含水层参数的途径, 收到良好的效果。

1 抽水试验

潜水完整井定流量抽水试验场布置在内蒙古正蓝旗上都音高勒镇的北部。含水层为上都河一级阶地的第四系孔隙潜水含水层, 岩性为中细砂, 经水文地质勘察查明含水层平均厚度 H 为 40m。抽水孔钻到隔水层, 孔深为 43m。8 个观测孔按 X, Y 轴方向布置 (图 1)。抽水的定流量为 $0.702\text{m}^3/\text{min}$, 抽水总时间为 4130min。以 1 号观测孔为例的抽水试验数据列在表 4、它实测降深曲线由图 2 中给出。

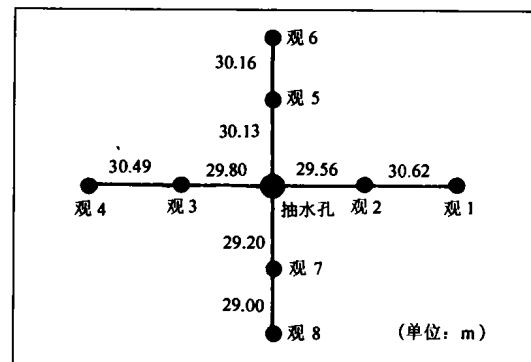


图 1 抽水孔及观测孔布置示意

2 基于抽水试验的遗传算法模型建立

2.1 实测降深 - 时间曲线分析

由图 2 可看出抽水过程有 3 个阶段^[2]。

第一个阶段: 抽水初期, 降深 - 时间曲线与承压水完整井抽水时的 Theis (泰斯) 曲线相一致, 主要表现为潜水位下降了, 但含水层不能立即通过重力排水把其中的水排出, 只是由于压力降低引起水的瞬时释放, 即弹性释水。含水层的反应和 1 个贮水系数很小的承压含水层非稳定流过程相似, 故此

收稿日期: 2003-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50139040)

作者简介: 贾德彬 (1966 -), 男 (汉族), 内蒙古巴彦淖尔盟人, 在读博士, 副教授。

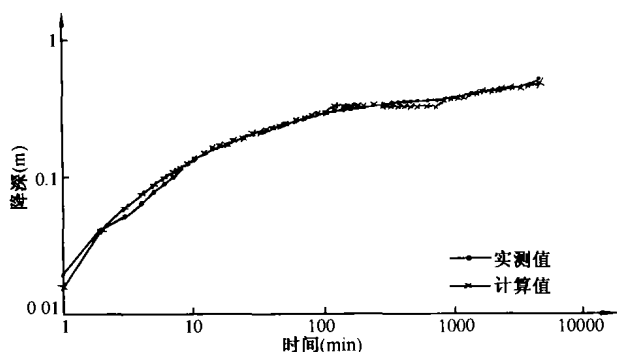


图2 1号观测孔实测降深曲线与计算降深曲线拟合

阶段降深可以近似用承压水完整井的 Theis 公式表示:

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W(u_1) \quad t \in [t_a, t'_a] \quad (1)$$

$$u_1 = \frac{r^2 \cdot \mu^*}{4 T t} \quad (2)$$

$$W(u_1) = -0.577216 - \ln u_1 + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cdot \frac{u_1^n}{n \cdot n!} \quad (3)$$

式中 s_1 ——抽水影响范围内抽水初期任一点任一时刻的水位降深 (m); μ^* ——潜水含水层等价贮水系数; t ——从初始抽水开始到计算时刻的时间 (min); t_a ——初始抽水开始时间; t'_a ——初始抽水终止时间 t 值; Q ——抽水流量 (m^3/min); T ——导水系数 (m^2/min); r ——观测孔到抽水井的距离 (m); $W(u)$ ——井函数。

第二个阶段: 降深-时间曲线的斜率减缓, 明显的偏离 Theis 曲线, 有的甚至出现短时的似稳定。它反映潜水含水层已有疏干排水过程, 含水层上部出现的水流速度垂直分量伴随压力下降向下补给含水层, 使水位下降速度明显减缓。含水层的反应类似于 1 个受到越流补给的承压含水层。此阶段, 抽水量与弹性释水量和重力排水量之和均衡, 出现短时间的似稳定, 降深-时间曲线为与抽水初期和末期的降深-时间曲线相切的水平直线。可用下式表示

$$s_3 = s'_1 = s'_2 = \frac{s'_1 + s'_2}{2} \quad t \in (t'_a, t'_b) \quad (4)$$

式中 s_3 ——抽水影响范围内抽水中期任一点任一时刻的水位降深 (m); s'_1 ——抽水影响范围内抽水初期末时刻任一点的水位降深 (m); s'_2 ——抽水影响范围内抽水末期初时刻任一点的水位降深 (m); 其它符号同前。

第三个阶段: 这个阶段的降深-时间曲线又与 Theis 曲线重合。说明重力排水已跟得上水位下降,

迟后疏干影响逐渐变小, 可以忽略不计。抽水量来自重力排水, 降落漏斗扩展速度增大。此时降深也可以近似用 Theis 公式表示:

$$s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W(u_2) \quad t \in [t'_b, t_b] \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{r^2 \cdot \mu}{4 T t} \quad (6)$$

$$W(u_2) = -0.577216 - \ln u_2 + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cdot \frac{u_2^n}{n \cdot n!} \quad (7)$$

式中 s_2 ——抽水影响范围内抽水末期任一点任一时刻的水位降深 (m); μ ——潜水含水层重力给水度; t'_b ——抽水末期开始时的 t 值; t_b ——抽水结束时间; 其它符号同前。

2.2 目标函数表达式

考虑降深-时间曲线 3 个阶段的特性, 建立分段最优拟合计算的遗传算法目标函数, 以求导水系数 T 、贮水系数 μ^* 和重力给水度 μ 。

$$\min f(T, \mu^*, \mu, t'_a, t'_b) = \sum_{t=t'_a}^{t'_a} |s_r(t) - s_1(t)| + \sum_{t=t'_b}^{t'_b} |s_r(t) - s_2(t)| + \sum_{t=t'_a}^{t'_a} |s_r(t) - s_3(t)| \quad (8)$$

式中 $s_r(t)$ ——抽水 t 时刻的实测降深值 (m); 其它符号同前。

2.3 决策变量上下界的选择

从理论上讲选择决策变量变化范围没有限制, 但好的决策变量变化范围的初选值可以减少遗传算法的迭代次数, 节省计算时间。

2.3.1 各观测孔 T 、 μ^* 以及 μ 的上、下界

根据抽水孔柱状图对含水层岩性描述确定各观测孔的 T 、 μ^* 、 μ 上下界如下:

T 的优化范围为 (0.01, 1); μ^* 的优化范围为 (0.00001, 0.005); μ 的优化范围为 (0.0001, 0.05)。

2.3.2 t'_a 、 t'_b 的上、下界

作出各观测孔实测降深-时间曲线图 (图 2), 对它们分析并按抽水第二阶段曲线起始、终止时间变化范围选取 t'_a 、 t'_b 的上、下界为 (100, 900)。

3 遗传算法求解

3.1 迭代参数的选择

父代群体个体数选 300; 决策变量数为 5; 迭代误差选 0.0; 井函数式中 n 取 4。

各观测孔遗传算法运行迭代参数

表 1

	观 1	观 2	观 3	观 4	观 5	观 6	观 7	观 8
迭代次数	79	66	72	76	84	63	62	78
目标函数	0.1975	0.3881	0.8911	0.1917	0.337	0.2082	0.4726	0.2807
适应度值	24.9858	6.5958	1.2579	26.5028	8.7305	22.5517	4.4576	12.5306

求得的抽水试验各观测孔参数

表 2

	观 1	观 2	观 3	观 4	观 5	观 6	观 7	观 8
导水系数 T (m^2/min)	0.7609	0.5895	0.5910	0.7243	0.6323	0.7608	0.6228	0.7671
贮水系数 μ^*	0.0009	0.0012	0.0012	0.0013	0.0017	0.0011	0.0014	0.0013
重力给水度 μ	0.0025	0.0040	0.0048	0.0035	0.0048	0.0026	0.0046	0.0038
t'_a	140	200	200	140	160	140	200	180
t'_b	800	800	800	700	800	700	700	800

遗传算法推求的导水系数 T (KH) 与其他方法推求的 T 间的比较

表 3

	X 坐标					Y 坐标				
	观 1	观 2	观 3	观 4	平均	观 5	观 6	观 7	观 8	平均
遗传算法	0.7609	0.5895	0.5910	0.7243	0.6664	0.6323	0.7608	0.6228	0.7671	0.6971
恢复水位法	0.7210	0.5820	0.5700	0.7100	0.6458	0.7100	0.5990	0.5520	0.6970	0.6395
直线图解法	0.7642	0.5210	0.5360	0.7410	0.6405	0.6340	0.6280	0.5520	0.7010	0.6288

1 号观测孔降深实测值和计算值的对比分析

表 4

时间 (min)	实测值 (m)	计算值 (m)	绝对误差	相对误差 (%)	时间 (min)	实测值 (m)	计算值 (m)	绝对误差	相对误差 (%)
1	0.019	0.015	-0.004	-20.15	140	0.309	0.333	0.024	7.781
2	0.041	0.04	-0.001	-3.076	160	0.315	0.333	0.018	5.728
3	0.052	0.059	0.007	13.931	180	0.322	0.333	0.011	3.43
4	0.064	0.075	0.011	17.049	200	0.327	0.333	0.006	1.848
5	0.079	0.088	0.009	11.279	240	0.334	0.333	-0.001	-0.286
6	0.089	0.099	0.01	11.227	280	0.338	0.333	-0.005	-1.466
7	0.099	0.109	0.01	9.737	320	0.344	0.333	-0.011	-3.185
8	0.114	0.117	0.003	2.787	360	0.348	0.333	-0.015	-4.298
9	0.124	0.125	0.001	0.67	400	0.354	0.333	-0.021	-5.92
10	0.132	0.132	0	0	450	0.356	0.333	-0.023	-6.448
12	0.146	0.144	-0.002	-1.409	500	0.362	0.333	-0.029	-7.999
14	0.158	0.154	-0.004	-2.286	600	0.363	0.333	-0.03	-8.252
16	0.166	0.164	-0.002	-1.485	700	0.364	0.333	-0.031	-8.504
18	0.174	0.172	-0.002	-1.34	800	0.38	0.368	-0.012	-3.031
20	0.182	0.179	-0.003	-1.653	900	0.382	0.377	-0.005	-1.284
24	0.194	0.192	-0.002	-1.158	1000	0.385	0.385	0	0
28	0.209	0.203	-0.006	-3.05	1100	0.393	0.392	-0.001	-0.312
32	0.213	0.212	-0.001	-0.427	1200	0.398	0.398	0	0
36	0.224	0.22	-0.004	-1.573	1400	0.412	0.409	-0.003	-0.624
40	0.228	0.228	0	0	1600	0.424	0.419	-0.005	-1.13
45	0.234	0.236	0.002	1.041	1800	0.426	0.428	0.002	0.431
50	0.244	0.244	0	0	2000	0.429	0.436	0.007	1.528
60	0.254	0.257	0.003	1.232	2200	0.438	0.443	0.005	1.037
70	0.264	0.268	0.004	1.615	2600	0.449	0.455	0.006	1.288
80	0.278	0.278	0	0	3000	0.455	0.465	0.01	2.258
90	0.286	0.286	0	0	3400	0.464	0.474	0.01	2.252
100	0.295	0.294	-0.001	-0.3	4130	0.519	0.489	-0.03	-5.836
120	0.304	0.333	0.029	9.554					
相关系数	0.996								
残 差	0.008								
平方和									

3.2 迭代过程

本研究采用了基于实数编码的遗传算法, 算法历经逐次选择、杂交、变异 3 个过程时, 以适应度对个体进行综合评价, 直至最优个体的目标函数值的绝对值小于或等于收敛误差值。

3.3 求解结果

表 1 给出各观测孔求参迭代次数、适应度函数、目标函数。表 2 给出了推求的水文地质参数。表 3 给出了推求的参数与其他方法推求的参数间的对比。表 4 给出了用推求的参数按泰斯公式计算的各项抽水历时的计算降深与抽水试验实际降深间的对比分析。图 2 给出 1 号观测孔实测降深曲线与计算降深曲线拟合图。

4 结论

(1) 遗传算法不要求参数估计模型可微、连续、可线性化, 因此直接利用目标函数值的信息, 从众多点出发, 在较大区域内做出 3 段的快速自适应并行搜索, 得出由表 2 给出的反映在各段上的诸参数。各观测孔降深实测值和计算值拟合相当好, 图 2 给出 1 号观测孔降深的实测降深曲线与计算降深曲线拟合图。表 4 给出以 1 号观测孔降深实测值和计算值的对比, 两者相关系数 0.996 且残差平方和为 0.008。因此, 遗传算法在水文地质求逆过程中是 1 种可行的方法。

(2) 用水位恢复方法和直线图解法求出的 T 、 μ 、 μ' 等参数和抽水时段按 Theis 公式反求出降深, 称此降深为计算降深, 点绘计算降深和时间关系曲线。图 3、图 4 给出 1 号观测孔实测降深曲线和其他 2 种不同方法的计算降深曲线的拟合图。比较图 2、3、4, 遗传算法和恢复水位法曲线拟合较好, 但恢复水位法是采用 Theis 公式的近似式求参, 其精度没有 Theis 公式的遗传算法理想, 而且遗传算法与传统配线法相比简单、方便、快速。

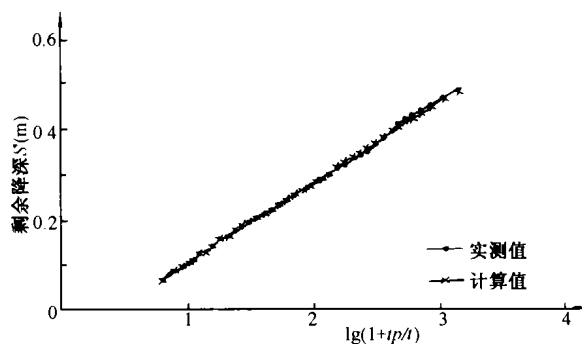


图 3 1 号观测孔恢复水位法拟合曲线

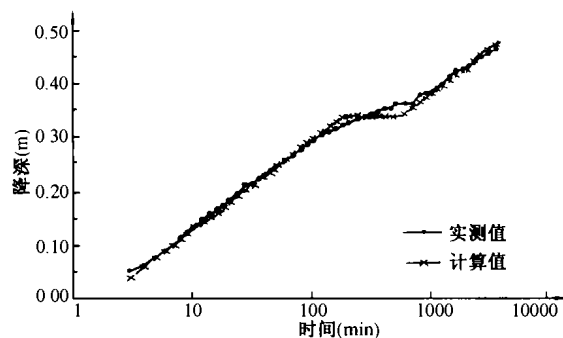


图 4 1 号观测孔直线图解法拟合曲线

(3) 表 3 给出各观测孔不同方法得出的 T 值和 X 、 Y 方向上的平均值, 由此可近似认为 T 在平面上各向同性。

参 考 文 献

- [1] 雅·贝尔. 地下水水力学 [M]. 地质出版社 1985.
- [2] 薛禹群. 地下水动力学原理 [M]. 地质出版社. 1992.
- [3] 金菊良等. 水资源系统工程 [M]. 四川科学技术出版社. 2002.
- [4] 吴剑峰等. 基于连续不确定区域的遗传算法求水文地质逆问题 [J]. 水利学报, 2002 (10).
- [5] 刘廷玺, 朱仲元等. 推求含水层参数的一种新方法—— s - $\ln r$ 直线趋势模拟法 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2002 (2).
- [6] 朝伦巴根等. 水文水资源水环境应用软件研制与开发 [M]. 内蒙古农牧学院水资源研究所, 1992.
- [7] 吴剑峰, 朱学愚, 阎婷婷. 运用 ModIME 模拟潜水含水层应注意的问题 [J]. 工程勘察, 2002 (2): 17~19.
- [8] 武强, 董东林, 武刚等. 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.
- [9] 贾金生, 田冰, 刘昌明. Visual MODFLOW 在地下水模拟中的应用——以河北省栾城为例 [J]. 河北农业大学学报, 2003, 26 (4): 71~78.
- [10] 吴吉春, 刘培民, 姜清波等. 山东龙口市地下水资源管理模型 [J]. 南京大学学报 (地球科学版), 1992 (1): 93~100.
- [11] 吴吉春, 薛禹群, 黄海等. 山西柳林泉裂隙发育区溶质运移三维数值模拟 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 2000, 36 (6): 728~734.
- [12] 钱家忠, 吴剑峰, 朱学愚等. 徐州市张集水源地质裂隙岩溶水三维等参有限元数值模拟 [J]. 水利学报, 2003 (3): 37~41.
- [13] 薛禹群, 朱学愚, 吴吉春等. 地下水动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.