

【水文·泥沙】

全程曲线拟合法和 Aquifertest 水文地质求参

杜 川^{1,2}, 梁秀娟^{1,2}, 张 茜^{1,2}, 陈 章³, 李文娟³

(1. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130021;
3. 中冶地勘岩土工程总公司 邯郸分公司, 河北 邯郸 056000)

摘 要: 抽水试验是获取含水层水文地质参数的主要方法, 求参结果直接影响对调查区水文地质条件的认识和地下水开发利用。传统求参方法存在主观影响大、求参时间长、易受外界影响和抽水阶段数据的不足等问题。通过全程曲线拟合法和 Aquifertest 软件分别从配线法和水位恢复法两个角度进行求参, 并结合全程曲线拟合法确定最终取值。结果表明, 采用 Aquifertest 软件求参便捷、准确, 与水位恢复法求参结果的差异相对较小, 全程曲线拟合法求参值具有唯一性和可靠性, 多种方法结合求参能更真实反映水文地质情况。

关 键 词: 抽水试验; 水文地质参数; Aquifertest 软件; 配线法; 水位恢复法; 全程曲线拟合法

中图分类号: P641.73 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.04.007

Hydrogeological Parameters Solution Using Entire Curve Fitting Method and Aquifertest Software

DU Chuan^{1,2}, LIANG Xiu-juan^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, CHEN Zhang³, LI Wen-Juan³

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China;

3. Handan Branch of China Metallurgical Geological Prospecting Geotechnical Engineering Corporation, Handan 056000, China)

Abstract: Pumping test is the main method to obtain aquifer hydrogeological parameters and the results directly affect the recognizing and exploitation of the hydrogeological conditions of study area. The traditional methods have the problems of being effected easily by subjective judgment and external environmental conditions, taking long time to calculate and lacking data about pumping stage. This paper used the entire curve fitting method and Aquifertest software from the standard curve method and recovery method to calculate parameters individually, and combined with the entire curve fitting method to determine the final value. The results show that using Aquifertest software method to calculate parameters is convenient and accurate; the results have smaller differences using water level recovery method; and the entire curve fitting method has the advantage of uniqueness and reliability in deciding the parameters. Combining different methods can more truly reflect the hydrogeological conditions.

Key words: pumping test; hydrogeological parameters; Aquifertest software; standard curve method; water level recovery method; entire curve fitting method

抽水试验是获取含水层水文地质参数的主要方法, 通过从钻孔或水井中抽水, 定量评价含水层富水性, 计算含水层水文地质参数和判断某些水文地质条件^[1]。抽水试验的主要目的之一就是确定含水层的水文地质参数(渗透系数 K 、导水系数 T 等), 为相关工程设计提供基础依据。水文地质参数计算结果要能真实地反映项目区的水文地质条件, 求参主要包括稳定流求参和非稳定流求参。稳定流求参计算方法主要有 Dupuit 公式法、Thiem 公式法等, 一般要求水文地质条件简单, 符合公式的计算条件。稳定流求参采用定流量抽水试验获得水位降深数据, 抽水试验条件容易控制, 但能够求解的参数相对较少。非稳定流求参方法主要包括 Theis 配线法、Jacob 直线图解法、水位恢复法等^[2], 所求水文地质参数较多, 能够反映复杂的水文地质条件, 但非稳定流抽水试验条件不易控制、计算过程比较繁琐。

传统的求参计算方法存在的主要问题是: 水文地质参数的

计算结果往往因人而异, 因采用的方法和时段不同而得到不同的计算结果, 最终影响所求参数的准确性, 从而对地下水资源评价产生不利影响。

近年来, 随着计算机技术的发展, 求解水文地质参数的配线法等均可借助计算机完成, 进行多个时段的求解优化, 不仅大大减轻了工作量, 而且提高了计算精度。求解水文地质参数的软件以 Aquifertest 为代表, 该软件专门用于抽水试验资料的分析、数据处理及求参等, 可以用较短的时间有效地处理试验

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4107217); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB42B07, 2007BAB28B04-03); 吉林省科技厅重点攻关项目(20100452); 吉林省自然科学基金资助项目(20140101164JC)。

作者简介: 杜川(1989—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通信作者: 梁秀娟(1964—), 女, 吉林公主岭人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、地下水方面的教学与研究工作。

E-mail: lax64@126.com

信息资料和完成更多的分析^[3]。

考虑到水文地质参数的复杂性,可以采用 Theis 配线法。另外,考虑恢复水位数据不受抽水试验过程中水跃值和三维流的影响,更为真实地反映含水层的信息,用水位恢复数据求取水文地质参数有其优越性,理论上求参结果是准确可靠的^[4]。采用全程曲线拟合法进行资料复核和辅助求解,也可取得较好的求参效果。鉴于此,本文以长春市城区某地抽水试验为例,利用抽水阶段数据和水位恢复阶段数据,应用 Theis 配线法、恢复试验法和全程曲线拟合法,采用人工手动求参和 Aquifertest 软件求参两种方式,并对计算结果进行对比分析,检验参数的合理性和精确性。

1 试验概况

该抽水试验场位于长春市朝阳区东北侧,试验含水层为沙岩孔隙裂隙承压水。地形较为平坦,地面高程为 213.85 ~ 216.89 m,地势比四周略低,地貌属于冲积洪积平原的波状台地,地表岩性主要为全新统人工堆积,其下伏主要为中更新统冲积洪积粉质黏土。场地埋藏有孔隙潜水、孔隙承压水和孔隙裂隙承压水含水层,地下水主要依靠大气降水入渗补给,通过潜水蒸发、侧向径流和人工开采排泄。

该抽水试验针对沙岩孔隙裂隙水含水层进行。抽水井 CH₁ 井深为 50.00 m,井口直径为 0.24 m,初始水位埋深 17.82 m;其西北侧布设有观测井 CH₁₋₁,相距 10.00 m,井深为 40.00 m,井口直径为 0.10 m,初始水位埋深 17.82 m。下部的承压水含水层厚度为 5.20 m,水位埋深为 16.93 ~ 17.82 m。成井过程中对上部含水层进行止水。抽水持续历时 565 min,抽水稳定流量为 6.30 m³/h,恢复水位观测时间为 100 min。

2 Theis 配线法求参

2.1 Aquifertest 软件求参

打开该软件后依次按照 Pumping Test—Discharge—Water Levels—Analysis—Site Plan—Reports 进行操作,每个步骤设置相关参数及填写相关试验资料,“Analysis”步骤中选择“Theis”配线法进行数据理论分析,结合专业知识通过软件手动拟合和自动拟合功能来调整曲线图,以达到最佳拟合效果(见图 1)。

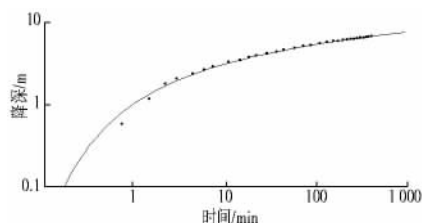


图 1 Aquifertest 软件 Theis 配线法拟合曲线

Aquifertest 参数计算结果为

导水系数: $T = 50.0 \text{ m}^2/\text{d}$

渗透系数: $K = 9.6 \text{ m/d}$

贮水系数: $\mu^* = 4.8 \times 10^{-4}$

2.2 人工手动求参

采用降深(s)—时间(t) Theis 配线法求参。利用观测井 CH₁₋₁ 不同时刻的降深值,在双对数纸上绘出 $s-t$ 曲线和

$W(u) - \frac{1}{u}$ 曲线进行拟合。根据 Excel 工作表可以插入图表并且便于修改、移动图表等特点,采用 Excel 进行手动配线。依据观测数据在双对数图表内绘制实际抽水试验降深与时间 $s-t$ 曲线,并将此曲线重叠在 $W(u) - \frac{1}{u}$ 标准曲线上,通过平移图表使实际资料曲线与标准曲线尽量拟合(见图 2)。

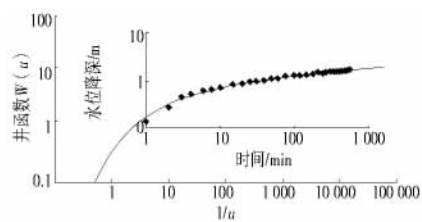


图 2 降深—时间配线法拟合曲线

任选一匹配点 A ,取坐标值: $W(u) = 4.4, \frac{1}{u} = 500.0, s = 1.01 \text{ m}, t = 40.0 \text{ min}, r = 10.00 \text{ m}, Q = 6.30 \text{ m}^3/\text{h}$ 。根据 Theis 公式 $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$ 和 $u = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt}$, 计算得: 导水系数 $T = \frac{Q}{4\pi s} \times W(u) = \frac{6.30 \times 24}{4 \times 3.14 \times 1.01} \times 4.4 = 52.4 \text{ m}^2/\text{d}$, 渗透系数 $K = \frac{T}{M} = \frac{52.4}{5.2} = 10.1 \text{ m/d}$, 贮水系数 $\mu^* = \frac{4Tt}{r^2} = \frac{4 \times 52.4 \times 40}{10^2} = 1.2 \times 10^{-4}$ 。

3 水位恢复法求参

抽水阶段结束,含水层中的地下水位开始逐渐回升。停止抽水后含水层中地下水位的变化不再受外界因素的干扰,其恢复变化比较平稳,也就比较容易准确观测。因此,通过分析计算水位恢复阶段的观测数据,能够得到较为准确可靠的水文地质参数^[5]。

3.1 Aquifertest 软件求参

步骤与 2.1 中相似。“Analysis”步骤中选择“Theis Recovery Analysis”配线法进行数据理论分析,结合专业知识通过软件手动拟合和自动拟合功能来调整曲线图以达到最佳拟合效果(见图 3)。

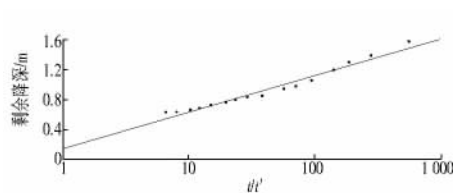


图 3 Aquifertest 软件配线法拟合曲线

Aquifertest 软件参数计算结果为 $T = 56.6 \text{ m}^2/\text{d}, K = 10.9 \text{ m/d}$ 。

3.2 手动求参

如不考虑水头惯性滞后动态,水井以流量 Q 持续抽水 t_p 时间后停抽恢复水位,那么在 t 时刻($t > t_p$) 的剩余降深 s' (原始水位与停抽后 t 时刻水位之差),可理解为流量 Q 继续抽水一直延续到 t 时刻的降深和从停抽时刻起以流量 Q 注水 $t - t_p$ 时间的水位抬升的叠加。两者均可用 Theis 公式计算。在 $\frac{r^2 \mu^*}{4Tt'} \leq 0.01$ 条件下,下式成立: $s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t'}$ (其中 $t' = t - t_p$)。

上式表明 s' 与 $\lg \frac{t}{t'}$ 呈线性关系, $i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$ 为直线段斜率。利用水位恢复资料绘出 $s' - \lg \frac{t}{t'}$ 曲线(见图 4), 计算其直线段斜率 i , 由此计算参数: $T = 0.183 \frac{Q}{i} = 56.8 \text{ m}^2/\text{d}$, $K = \frac{T}{M} = 10.9 \text{ m/d}$ 。

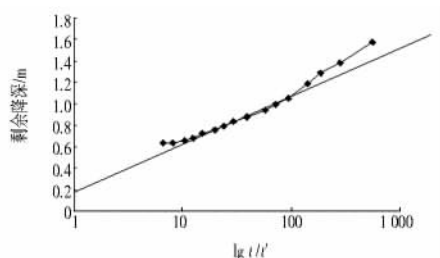


图 4 水位恢复法拟合曲线

4 全程曲线拟合法求参

4.1 全程曲线拟合法求参原理^[4]

全程曲线拟合法考虑承压含水层抽水试验的全过程, 根据抽水期间的观测资料和水位恢复资料, 利用 Theis 公式和优化理论确定含水层参数。在调参过程中, 只取一组适合各个试验阶段的参数, 保证了试验前后水文地质参数的一致性; 同时减少个别资料的偶然误差, 提高了计算精度^[4]。

抽水阶段, 采用 Theis 公式计算理论降深并进行理论与实际降深拟合, 公式为

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt}$$

式中: s 为抽水影响范围内任一点任一时刻的水位降深; Q 为抽水井的流量; $W(u)$ 为 Theis 井函数, 有表可查; T 为承压含水层导水系数, $T = KM$ (K 为渗透系数, M 为含水层厚度); a 为承压含水层导压系数; t 为抽水时间; r 为计算点到抽水井的距离; μ^* 为承压含水层的贮水系数。

水位恢复阶段, 采用剩余降深公式计算理论值并与实测值拟合, 公式为

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')]]$$

$$u' = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt}$$

$$t' = t - t_p$$

式中: s' 为剩余降深; t_p 为抽水井以定流量 Q 持续抽水时间。

将计算的理论值和实测值对比进行误差分析, 取最优结果作为最终的水文地质参数值。

4.2 实例分析

根据抽水试验资料, 绘制实测降深—时间($s_{\text{测}}-t$) 曲线和理论降深—时间($s_{\text{计}}-t$) 曲线, 通过不断调整渗透系数 K 和贮水系数 μ^* , 使理论曲线和实测曲线逐渐拟合(见图 5), 并根据曲线拟合程度及误差确定最优参数。

计算得到导水系数 $T = 54.50 \text{ m}^2/\text{d}$, 渗透系数 $K = 10.48 \text{ m/d}$, 贮水系数 $\mu^* = 3.0 \times 10^{-4}$ 。

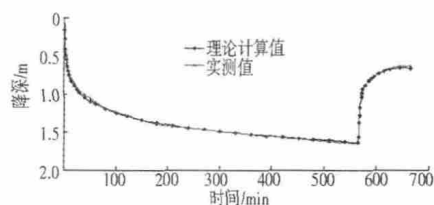


图 5 全程曲线拟合

5 求参结果及方法分析

5.1 求参结果分析

上述多种方法及途径的求参结果对比见表 1。

表 1 各方法求参结果对比

求参方法		水文地质参数		
		$\frac{T}{(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})}$	$\frac{K}{(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})}$	μ^*
Theis 配线法	手动求参	52.4	10.10	1.2×10^{-4}
	Aquifertest 自动求参	50.0	9.60	4.8×10^{-4}
	平均值	51.2	9.80	3.0×10^{-4}
水位恢复法	手动求参	56.8	10.93	
	Aquifertest 自动求参	56.6	10.88	
	平均值	56.7	10.90	
全程曲线拟合法		54.5	10.48	3.0×10^{-4}
最终取值		54.5	10.48	3.0×10^{-4}

(1) Theis 配线法手动求参与 Aquifertest 软件自动求参所得导水系数 T 和渗透系数 K 相差均为 4.80%, Aquifertest 软件所求渗透系数和导水系数略小, 贮水系数略大^[4], 原因是 Aquifertest 自动求参是按照总体曲线拟合的, 无法剔除异常点影响, 从而使曲线拟合效果有一定的差异。

(2) 水位恢复法手动求参与 Aquifertest 软件自动求参所得导水系数 T 和渗透系数 K 相差均为 0.37%, 两种方法结果基本一致。说明该阶段水位受外界影响较小, 数据稳定, 曲线拟合减少了异常点的影响, 参数计算结果比较相近^[4]。

(3) Theis 配线法计算的参数波动性与水位恢复法相比较, 说明水位实测值在一定程度上受三维流等因素的影响, 导致数据不稳定。

(4) 全程曲线拟合法计算结果介于 Theis 配线法和水位恢复法求参结果之间, 且基本等于后两者求参结果均值, 可见全程曲线拟合法所求得的承压含水层参数基本接近实际参数值, 抽水过程和水位恢复过程的参数保持一致, 减少了个别资料的误差影响, 计算精度更高。

(5) 综合三种求参方法, 全程曲线拟合法拟合效果最好, 所用的资料能够反映含水层条件和抽水试验的整个过程, 因此最终取全程曲线拟合法的计算结果。

本文计算的水文地质参数处于弱胶结的中沙岩水文地质参数经验值范围, 结合水文地质勘察的岩性, 认为计算结果是合理的。计算降深与实测降深的对比, 表明所计算的参数是符合实际的、可靠的。

5.2 求参方法分析

(1) Aquifertest 软件自动求参可以充分利用抽水阶段的全部观测资料, 避免了个别资料的偶然误差, 提高了计算精度^[4-11]。但由于抽水初期实际曲线和

均匀为目的的调节,是一种已知全部来水过程的事后调节,其调节后的供水过程年内变幅较小,但年际变化较大(图 1)。

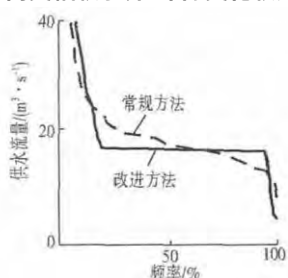


图 1 供水流量频率曲线

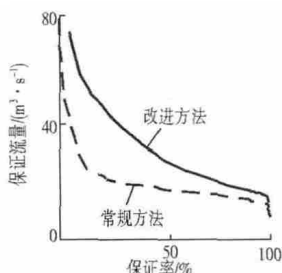


图 2 调节流量保证率曲线

(2) 改进方法在不预知来水也不能事先确定水库蓄水期和供水期的情况下,为了获得较大的保证流量,在整个运行期内都采用先蓄方式运行,即先按保证流量供水,尽早把水库蓄满。由于水库保持高水位时间较长,因此若遇后期来水偏枯,则水库调节供水能力较强,可以获得较大的供水保证调节流量。

(上接第 21 页) 抽水后期实际曲线常与标准曲线不易拟合准确,因此抽水时间不宜过短且求参过程应尽量采用抽水稳定阶段的数据。人工手动求参则能够根据经验剔除不合理的数据,使求参结果更加准确、接近实际。

(2) Theis 配线法采用的抽水阶段试验数据受外界影响相对较大,容易出现异常点干扰正常判断和最终的曲线拟合,而受外界影响较小的水位恢复数据较为稳定,利用恢复试验法所求参数不受外界因素影响,能够最大程度地反映实际地质情况。

(3) 全程曲线拟合法计算参数准确而且便捷,充分利用了抽水过程中的全部信息,并可以剔除异常点,在保证实测降深与计算降深误差平方和最小、理论曲线与实测曲线拟合最优的情况下,保证了所求含水层参数值的唯一性和可靠性,给出了含水层参数的最优解。

6 结 语

(1) 基于 Aquifertest 软件用 Theis 配线法、水位恢复法分别求解水文地质参数,并传统手动求参结果对比分析,通过全程曲线拟合法进一步检验所求参数的合理性和精确性。结果显示, Aquifertest 软件求参与手动求参结果基本一致,但手动求参过程较为繁琐,在曲线拟合时容易受主观影响而导致求参结果因人而异,相比之下 Aquifertest 软件求参更加客观便捷,其结果可较为真实地反映水文地质情况。采用全程曲线拟合法进行资料复核和辅助求解,也取得了较好的求参效果。

(2) 在进行水文地质参数计算时,要结合 Aquifertest 软件、

(3) 以城镇供水为主的水库,径流调节的目的是增加保证供水流量及保证供水总量,保证供水流量是确定工程规模和供水效益的主要依据。表 1、图 2 表明,改进方法计算的保证流量大于常规方法的。

(4) 实际工作中除了要对主要设计方案进行调节计算外,还可能需更多的调节计算方案供比较,例如当调节流量固定时调节库容与保证率的关系、当库容固定时调节流量与保证率的关系等。由图 2 可以看出:库容固定时,常规方法的调节过程不考虑保证率的因素,只能简化地以图 1 的频率曲线作为图 2 的概率曲线,实质是以典型时段的供水流量代替保证流量;改进方法的调节过程已考虑到保证率的控制,每一个方案的保证流量都是从长系列中进行概率统计得出的。由于改进方法比常规方法更有针对性地主动调节了径流,并按保证率的准确定义计算了保证流量,因此同等条件时改进方法的保证流量都大于常规方法的(图 2 主要用于两种方法的全面对比,实际工作中低于设计保证率的方案是不需要计算的)。

参考文献:

- [1] 王平. 综合利用水库常规调度图编制方法的改进 [J]. 水能技术经济, 1995, 15(2): 31-35.
- [2] 王平. 水库灌溉或供水调度图常规编制方法的改进 [J]. 水电站设计, 2008, 24(4): 95-97.

【责任编辑 翟成亮】

全程曲线拟合法和人工手动求参,充分利用抽水和水位恢复两个阶段的试验数据,采用多种方法计算,以保证计算结果的准确性和有效性,然后根据计算结果综合分析,科学、合理地选取参数值。

参考文献:

- [1] 国家技术监督局. GB/T 14157—1993 水文地质术语 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [2] 肖长来, 梁秀娟, 王彪. 水文地质学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] 庞国兴. 水文地质参数的可视化软件 Aquifer Test [J]. 地下水, 2012, 34(3): 195-196.
- [4] 郭建青, 周宏飞, 李彦. 分析含水层水位恢复数据的多次直线解析法 [J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3246-3250.
- [5] 郭建青, 李彦, 王洪胜, 等. 含水层抽水试验水位恢复过程数据的直线图解分析法 [J]. 水利学报, 2004(10): 22-26.
- [6] 肖长来, 梁秀娟, 崔建铭, 等. 用全程曲线拟合法确定承压含水层参数的研究 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 22-25.
- [7] 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.
- [8] 王在岭, 杨建民. 用水位恢复数据计算承压含水层水文地质参数 [J]. 铁道勘察, 2006(2): 38-40.
- [9] 武强, 董东林, 武钢, 等. 水资源评价的可视化专业软件与应用潜力 [J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(5): 21-23.
- [10] 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.
- [11] Yeh Jim T C, Liu Shuyun. Hydraulic Tomography: Development of a new Aquifer Test Method [J]. Water Resources Research, 2000, 36(8): 2095-2105.

【责任编辑 张华兴】