第6卷第11期 2014年11月

# AquiferTest 软件在地下水动力学 教学中的应用

刘延锋 刘 倩 ,王建军

(中国地质大学 环境学院 湖北 武汉 430074)

摘 要: AquiferTest 软件是处理抽水试验与微水试验的专业软件,在地下水动力学教学中引入该软件,通过讲授其 主要功能和操作过程,可使学生迅速掌握处理抽水试验和微水试验数据技术,进行边界性质和含水层水力性质诊断,准 确获取水文地质参数,并提升学生学习兴趣,降低学生对复杂公式的畏难心理,在实际教学过程中取得了良好效果。学 生们快速掌握了抽水试验和微水试验处理方法,并能够进行复杂条件下的水位和降深预测。

关键词: 抽水试验; 微水试验; 水文地质参数; AquiferTest 中图分类号: C642.1 文献标志码: A 文章编号: 1674 – 5884( 2014) 11 – 0094 – 04

抽水试验是通过水文地质钻孔抽水确定水井出水能 力,获取含水层的水文地质参数,判明某些水文地质条件 的野外水文地质试验工作。抽水试验的主要任务之一是 确定含水层水文地质参数,如渗透系数(K)、导水系数 (T)、释水系数 $(\mu_e)$ 和给水度 $(\mu_d)$ 等。稳定流抽水试验 数据一般采用经验公式处理<sup>[1]</sup>,非稳定流抽水试验数据 多采用配线法、直线图解法进行处理,有越流补给但不考 虑弱透水层弹性释水时,可采用拐点法计算<sup>[1-2]</sup>。水文 地质参数确定的精度直接影响地下水渗流场定量分析与 地下水资源评价的可靠性。生产过程中多采用配线法和 直线图解法处理非稳定流抽水试验数据来确定参数,在 处理过程中存在人为主观判断,造成相同数据不同人计 算出的结果不同,从而影响地下水渗流场定量刻画与比 较<sup>[3]</sup>。为了便于数据处理,出现了一些处理抽水试验数 据的专业软件,如 AquiferTest、AQTESOLV、Aquifer - Well - Test 等, 它们采用了优化技术, 降低了人为主观性, 处理 速度快,计算结果精确,可对比性好,在国外得到了比较 广泛的应用;但国内目前在生产实际中的应用并不多,一 些学者和单位开始使用 AquiferTest 软件进行数据处 理<sup>[3-4]</sup>。AquiferTest 软件是加拿大滑铁卢水文地质公司 (Waterloo Hydrogeologic Inc.) 开发研制的专门用于抽水 试验和微水试验(Slug test)资料分析、数据处理的图形化 分析软件 处理试验数据快捷简便 软件中包含了多种分 析模型 ,包括 Theis、Cooper & Jacob、Theis with Jacob Correction、Double Porosity 等模型 能够确定多种类型含水层

的参数,如承压含水层、潜水含水层、越流含水层和基岩裂隙含水层等,并能够进行水位预测、井群干扰降深计算、含水介质性质判断以及试验数据处理报告等功能<sup>[5]</sup>。

非稳定流抽水试验数据处理及水位降深计算是地下 水动力学这门专业基础课实践教学中的重要内容,也是 水文地质调查的重要工作内容。由于非稳定井流理论公 式比较复杂,计算过程中需要查表获取数据,过程繁琐, 学生通常难以完全理解和掌握抽水试验数据处理理论与 方法。手动处理抽水试验数据需要透明双对数纸、标准 曲线图、单对数坐标纸等材料,且存在一定主观性,影响 计算精度。而使用 AquiferTest 软件处理抽水试验和微水 试验数据 学生只要掌握基本原理及不同水文地质条件 所对应的解析模型就能进行数据处理,很容易地掌握各 种抽水试验数据的处理方法。利用该软件的降深预测、 边界条件性质判断等功能,可以帮助学生更好地理解问 题 增加学习兴趣 还便于学生开展探索性研究。在教学 过程中 笔者指导学生使用 AquiferTest 4.2 测试版进行抽 水试验数据处理、水文地质条件识别和降深预测等,学生 们很快掌握了相关技巧,并提高了学习兴趣。

1 抽水试验数据处理

## 1.1 数据

在某灰岩承压含水层中进行抽水试验,抽水井流量 比较稳定,平均为 $Q = 5 \ 136 \ m^3 / d$ ,观测孔 $G_1$ 距抽水井的 距离为 $r = 52 \ m$ ,观测孔中水位降深(见表1)。

收稿日期:2014-04-28

基金项目:中国地质大学(武汉)教学研究项目资助(2013B07)

作者简介:刘延锋(1975-) ,男 副教授 ,博士,主要从事水文地质专业教学与科研工作。

表1 无界承压含水层中抽水试验观测资料<sup>[6]</sup>

	2	4	6	8	10	16	20	26	30	40	50	60	70	80	90	100	120
G <sub>1</sub> 降深(m)	0.13	0.22	0.31	0.38	0.42	0.64	0.73	0.80	0.86	1.01	1.10	1.22	1.28	1.32	1.34	1.35	1.45
累计时间(min)	180	210	240	270	300	360	420	480	600	720	900	1 020	1 500	2 100	3 000	4 200	6 000
G <sub>1</sub> 降深(m)	1.64	1.68	1.72	1.76	1.81	1.82	1.92	2.02	2.15	2.18	2.33	2.39	2.51	2.67	2.87	2.98	3.13

1.2 配线法

在透明双对数坐标纸上绘制观测孔的 lgs - lgt 实测 曲线 将该实测曲线与标准曲线进行对比,当曲线最佳拟 合时,选择匹配点(见图 1),坐标分别为:

W(u) = 1,  $\frac{1}{u} = 1$ , s = 0.42 m t = 2.5 min = 1.74 × 10<sup>-3</sup> d

依据泰斯(Theis) 公式,可推导出计算含水层的导水 系数 *T* 和释水系数 μ<sub>e</sub> 值的公式:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{5\,136}{4\times3.\,14\times0.\,42} \times 1 =$$

973.12 ( $m^2/d$ )

$$\mu_e = \frac{4Tt}{r^2} = \frac{4 \times 973.12 \times 1.74 \times 10^{-3}}{52^2} = 2.50 \times 10^{-3}$$



## 图1 标准曲线配比法图解

在 AquiferTest 软件中的 Pumping Test 选项卡中输入 抽水试验信息、物理量单位、含水层厚度、抽水井和观测 井的坐标、类型、半径、滤管位置和孔隙度等基本信息; 在 Discharge 选项卡中输入开采量; 在 Water Levels 选项卡中 输入观测孔的水位或降深。在 Analysis 选项卡中选择所 使用的观测孔,图形区会显示 *s* – *t* 曲线,界面右侧显示 AquiferTest 软件中分析模型,在本例中选择 Theis 模型,然 后点击 Fit 按钮 程序运行收敛后,在 Results 区中显示计 算结果。使用 G<sub>1</sub> 观测数据获取的参数值为: *T* = 954 m<sup>2</sup>/ d  $\mu_e = 2.30 \times 10^{-3}$ 。

手动配线时  $\lg_{gs} - \lg_{dt}$  点的绘制及匹配点选取上具有 一定人为性 导致计算出的  $T 和 \mu_e$  值不尽相同。对学生 们手动配线法获取的参数值进行统计分析(见表 2) 结果 显示其确定的 T 值范围为 454.12 ~1 119.75 m<sup>2</sup>/d 标准 差为 94. 91 m<sup>2</sup>/d, 变差系数为 10. 34%;  $\mu_e$  值范围为 1. 79×10<sup>-3</sup>~4.67×10<sup>-3</sup>,标准差为 4. 12×10<sup>-4</sup>,变差系 数为 17. 87%。可见,尽管数据相同,受拟合程度判断的 主观性的影响,获取的参数差别很大,*T* 和 $\mu_e$  值的极差可 达 665.63 m<sup>2</sup>/d 和 2.88×10<sup>-3</sup>,最大值和最小值之比分别 为 2.5 和 2.6。

表 2 手动法获取参数的统计分析

休斗女物	配	线法	直线图解法				
统计参数 -	$T(m^2/d)$	$\mu_{e}$	$T(m^2/d)$	$\mu_{\scriptscriptstyle e}$			
最小	454.12	1.79E - 03	870.27	1.80E - 03			
最大	1119.75	4.67E – 03	1044.32	3.82E – 03			
极差	665.63	2.88E-03	174.05	2.02E - 03			
平均值	917.90	2.30E - 03	947.06	2.31E - 03			
标准差	94.91	4.12E – 04	31.69	3.53E – 04			
变差系数(%)	10.34	17.87	3.35	15.25			

#### 1.3 直线图解法

当  $u = \frac{\mu_e r^2}{4Tt} \leq 0.05$  时 ,Theis 公式可以近似表示为 Jacob 公式<sup>[2]</sup>:

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25Tt}{\mu_e r^2} = 0.183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2.25T}{\mu_e r^2} + 0.183 \frac{Q}{T} \lg t$$

可见 s 与 lgt 成线性关系 ,即 s - lgt 为直线(见图 2), 可利用直线段的斜率 m 确定含水层导水系数 T:

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} = 0.183 \times \frac{5136}{0.94} = 999.88(m^2/d)$$

延长直线段与 s = 0 横轴相交点为  $t_0 = 3 \min = 2.08 \times 10^{-3}$  d,可获得释水系数  $\mu_{\mu}$ :



与配线法相似 在输入基本信息和数据后 ,在 Analysis 选项卡中选择 Cooper & Jacob I 分析模型 ,点击 Fit 按 钮采用直线图解法进行求解。通过试算 ,使用 G1 观测孔 50min 之后的观测水位 ,计算出的参数为:  $T = 965 \text{ m}^2/\text{d}$  ,  $\mu_e = 2.17 \times 10^{-3}$  ,此时 ,观测孔处的 u = 0.044 < 0.05 ,满足 假设条件。计算结果与手动直线图解法计算出的参数很 相近 ,但释水系数偏差较大。

直线图解法亦存在一定主观性,学生们获取的参数 值亦存在较大差别,其中*T*值范围为870.27~1044.32 m<sup>2</sup>/d标准差为31.69 m<sup>2</sup>/d,变差系数为3.35%; $\mu_e$ 值范 围为1.80×10<sup>-3</sup>~3.82×10<sup>-3</sup>标准差为3.53×10<sup>-4</sup>,变 差系数为15.25%。尽管直线图解法比配线法结果的差 别幅度小,但获取的参数差别仍比较大,*T*和 $\mu_e$ 值的极差 可达174.05 m<sup>2</sup>/d和2.02×10<sup>-3</sup>,最大值和最小值之比分 别为1.2和2.1。

## 2 降深预测

利用 AquiferTest 软件还可以进行开采条件下的水位 降深预测 其过程与前述利用抽水试验数据确定参数相 似。首先在 Pumping Test、Discharge 选项卡中确定开采井 的位置、相关信息以及预测孔的位置,然后在 Water Levels 选项卡中输入预测时间,在水位或降深列中输入任意数 值,在 Analysis 选项卡中点击 Show Parameter Controls 按 钮 在 Parameter 对话框中输入导水系数和释水系数等参 数,并锁定;在右侧 Model Assumption 中将 Discharge 选项 设置为 Variable;点击 Fit 按钮进行计算,最后 Analysis 菜 单下的 Statistics 菜单项命令窗口中,可以获取预测水位 降深值。

群井阶梯状流量抽水的水位或降深预测非常繁琐, 且容易计算错误,利用 AquiferTest 软件则很容易实现。 某地区一无界承压含水层中有3 眼完整井开采,分布如 图3 所示,含水层的导水系数  $T = 200 \text{ m}^2/\text{d}$  释水系数  $\mu_e$  $= 2 \times 10^{-3}$ ,3 眼井的开采情况如表3 所示<sup>[6]</sup>。若用解析 法计算某一时刻观测点 M 处水位降深,则需要包含5 项 降深计算公式。利用 AquiferTest 软件,很容易就可以获 取 M 点处的降深历时曲线(见图4)。

#### 3 含水介质及边界性质诊断

AquiferTest 软件具有通过 *s* - *t* 曲线判断含水介质特性的功能。在 Analysis 选项卡中的 Diagnostic Graph 中 給

出了 Confined、Leaky or recharge boundary、Barrier boundary、Double porosity 和 Well effects 五种情况下的泰斯理论 降深(Theis type curve, 短划线)、特定条件下的理论降深 (Theoretical drawdown curve under the expected conditions, 黑色实线)及降深的时间导数(Drawdown derivative curve, 绿色实线)3条曲线。将实际曲线与5种标准曲线对比, 可以判断边界性质和含水介质特性。



图 3 开采井分布图



表3 抽水井工作情况一览表

井编号	抽水时间	抽出水量
井1	4月5日零点-4月15日零点	$40 \text{ m}^3/\text{h}$
井 2	4月7日零点-4月10日零点	$60 \text{ m}^3/\text{h}$
井3	4月2日零点-4月12日零点	$30 \text{ m}^3/\text{h}$

表 4 为某断裂附近承压含水层完整井抽水时的观测 孔降深数据,开采量为 1 000 m<sup>3</sup>/d,观测孔与抽水井位于 断裂同一侧,距开采井 20 m<sup>[6]</sup>。将相关信息输入 Aquifer-Test 软件 在 Analysis 选项卡中的 Diagnostic Graph 中显示 观测孔的实测降深及降深导数点线(见图 5),二者关系与 Barrier Boundary 标准图形一致 表明该断层为阻水断层。

表4	断层附近抽水试验观测孔降深数据 <sup>[6]</sup>
----	--------------------------------

累计时间(min)	1	2	3	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80
水位降深值(m)	0.05	0.1	0.13	0.2	0.25	0.35	0.47	0.55	0.66	0.74	0.81	0.86	0.96
累计时间(min)	100	120	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1 000
水位降深值(m)	1.05	1.13	1.25	1.4	1.52	1.63	1.8	1.92	2.02	2.11	2.18	2.25	2.3





#### 4 结 论

抽水试验及地下水位降深预测是地下水动力学教学 中的重要内容,也是水文地质实际工作中重要的工作内 容。依据地下水非稳定流理论手动处理抽水试验数据以 获取水文地质参数具有主观性,且费时费力。利用 AquiferTest软件可以快速确定水文地质参数及复杂开采 条件下的水位降深预测,人为主观性小,计算精度高。依 据实测降深及其导数曲线关系,可以确定抽水试验场地 的含水层性质、介质特征、边界条件及井效应等,选择更 为合适的模型进行抽水试验数据处理与降深预测。

通过在教学中引入 AquiferTest 软件,提高了学生的 学习兴趣,使学生快速掌握了抽水试验数据的处理方法, 并能够利用该软件进行水文地质条件诊断及降深预测, 提高了计算的准确度和精度。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钻孔抽水试验规程(SL320-2005) [S].西安:陕西人民教育出版社 2005.
- [2] 陈崇希 林敏 成建梅. 地下水动力学 [M]. 北京: 地质 出版社 2011.
- [3] 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):34-38.
- [4] 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, 10(10):58-60.
- [5] Schlumberger Water Services. AquiferTest User's Manual [R]. Waterloo: Waterloo Hydrogeologic Inc, 2010.
- [6] 靳孟贵,成建梅.地下水动力学实验与习题[M].北 京:中国水利水电出版社 2010.

(责任校对 莫秀珍)