

AquiferTest 软件在地下水动力学 教学中的应用

刘廷锋, 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: G642.1 **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(μ_e)和给水度(μ_d)等。稳定流抽水试验数据一般采用经验公式处理^[1], 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^[1-2]。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^[3]。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^[3-4]。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^[5]。

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 $Q = 5\ 136\ \text{m}^3/\text{d}$, 观测孔 G_1 距抽水井的距离为 $r = 52\ \text{m}$, 观测孔中水位降深 (见表 1)。

表 1 无界承压含水层中抽水试验观测资料^[6]

累计时间(min)	2	4	6	8	10	16	20	26	30	40	50	60	70	80	90	100	120
G ₁ 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 ₁ 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 $\lg s - \lg t$ 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:

$$W(u) = 1, \frac{1}{u} = 1, s = 0.42 \text{ m}, t = 2.5 \text{ min} = 1.74 \times 10^{-3} \text{ d}$$

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_e 值的公式:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{5\ 136}{4 \times 3.14 \times 0.42} \times 1 = 973.12 \text{ (m}^2/\text{d)}$$

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

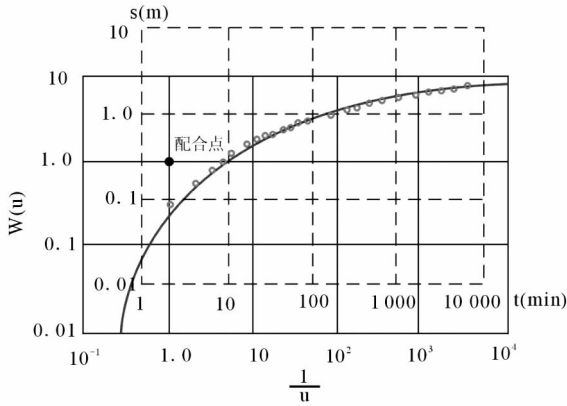


图 1 标准曲线配比法图解

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 G₁ 观测数据获取的参数值为: $T = 954 \text{ m}^2/\text{d}$, $\mu_e = 2.30 \times 10^{-3}$ 。

手动配线时, $\lg s - \lg t$ 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 μ_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 $454.12 \sim 1\ 119.75 \text{ m}^2/\text{d}$,标准

差为 $94.91 \text{ m}^2/\text{d}$,变差系数为 10.34% ; μ_e 值范围为 $1.79 \times 10^{-3} \sim 4.67 \times 10^{-3}$,标准差为 4.12×10^{-4} ,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 μ_e 值的极差可达 $665.63 \text{ m}^2/\text{d}$ 和 2.88×10^{-3} ,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

统计参数	配线法		直线图解法	
	$T(\text{m}^2/\text{d})$	μ_e	$T(\text{m}^2/\text{d})$	μ_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^[2]:

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

可见 s 与 $\lg t$ 成线性关系,即 $s - \lg t$ 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 :

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} = 0.183 \times \frac{5\ 136}{0.94} = 999.88 \text{ (m}^2/\text{d)}$$

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

$$\mu_e = \frac{2.25Tt_0}{r^2} = \frac{2.25 \times 999.88 \times 0.002\ 08}{52^2} = 1.73 \times 10^{-3}$$

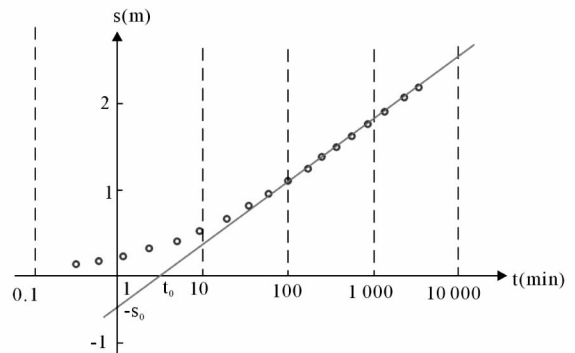


图 2 直线图解法图解

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 $870.27 \sim 1044.32 \text{ m}^2/\text{d}$,标准差为 $31.69 \text{ m}^2/\text{d}$,变差系数为 3.35% ; μ_e 值范围为 $1.80 \times 10^{-3} \sim 3.82 \times 10^{-3}$,标准差为 3.53×10^{-4} ,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 μ_e 值的极差可达 $174.05 \text{ m}^2/\text{d}$ 和 2.02×10^{-3} ,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^[6]。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,给

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。

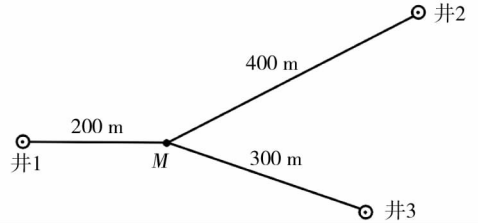


图 3 开采井分布图

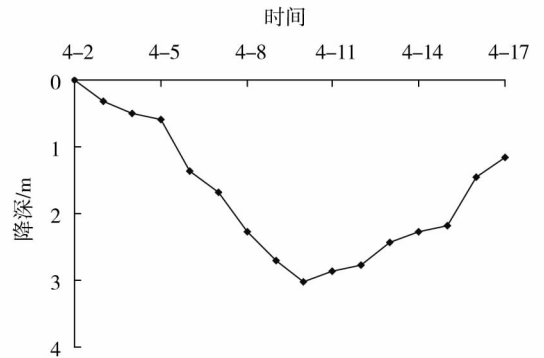


图 4 预测降深历时曲线

表 3 抽水井工作情况一览表

井编号	抽水时间	抽水量
井 1	4 月 5 日零点—4 月 15 日零点	40 m ³ /h
井 2	4 月 7 日零点—4 月 10 日零点	60 m ³ /h
井 3	4 月 2 日零点—4 月 12 日零点	30 m ³ /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 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$,观测孔与抽水井位于断裂同一侧,距开采井 20 m ^[6]。将相关信息输入 AquiferTest 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^[6]

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	1000
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

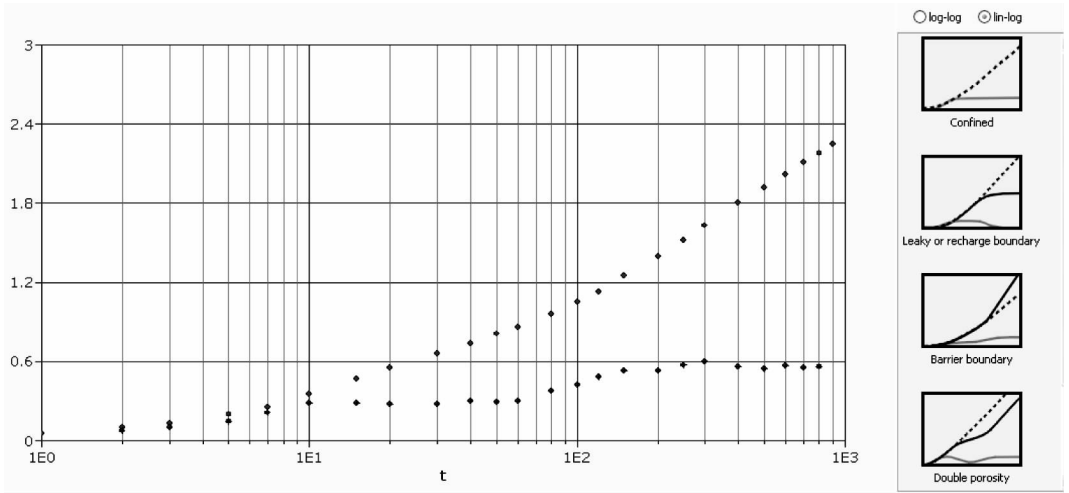


图 5 实测降深曲线及降深导数曲线与标准曲线对比图

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)