利用水位恢复资料求解水文地质参数的新方法

滕凯[1]，张丽伟[2]

（1. 齐齐哈尔市水务局，黑龙江 齐齐哈尔 161006；2. 齐齐哈尔市河道管理处，黑龙江 齐齐哈尔 161006）

摘要：针对目前利用水位恢复期的降深资料求解水文地质参数所存在的问题，以泰斯非稳定流计算公式为基础，通过对井函数的优化拟合，建立了一个一元线性回归方程，利用求解回归方程中的待定常数反求含水层的水文地质参数，与传统的其它计算方法比较，本文方法具有计算简捷，不依赖图表，求解精度高等优点。

关键词：非稳定流；水位恢复资料；水文地质参数；优化拟合；求解新方法

中图分类号：P641.2 **文献标识码**：A

Abstract: In order to solve the problems existed in the process to get the solution of hydrogeological parameters by using the drawdown date during groundwater level recovery, a simple linear regression equation on the basis of Thesis unsteady flow formula and the optimal fitting of well function is set up which makes use of the undetermined constants in the regression equation to solve the hydrogeological parameters of the aquifer. Compared with the traditional calculation methods, the said method bears the advantages such as simple calculation, non-dependence for charts and higher precision of solution.

Key words: unsteady groundwater flow; data for groundwater level recovery; hydrogeological parameter; optimal fitting; new method of solution

1 问题的提出

由于利用水位恢复资料求解水文地质参数可以避免因抽水设备及其它边界条件的干扰因素所造成的不利影响，因此参数的计算结果一般比较可靠。为了寻求在该条件下求解水文地质参数的计算方法，前人先后开展了大量的研究工作，已经提出并实际应用较广泛的求解方法主要有 3 种，一种为半对数曲线法[1, 2]（图解法），适用于井函数 $u<0.1$ 的情况；另一种为选择法[2, 3]（逐次逼近法），适用于 $u\geq0.1$ 情况；第 3 种为降深比值法[4]（解析计算法），适用于 $u\geq0.005$ 情况。由于图解法在绘制和数据读取时的人为随意性将对计算结果的精度产生一定的影响，且当观测孔与主孔的距离较大或抽水时间较短时（为了减少抽水费用），$u<0.1$ 情况很难满足，因此实际应用受到限制。选择法需通过反复的试算进行逼近，不仅依赖有关图表，而且查图插值存在人为误差，求解精度不高，过程也比较繁复。解析计算法虽然可以直接获解水文地质参数，但计算过程略显复杂，而且不能充分利用水位恢复期的实测资料，成果难免存在局限性。针对上述方法存在的问题，笔者采用优化拟合的方法，通过对泰斯井函数的优化拟合，提出了利用水位恢复期的降深资料求解水文地质参数的计算方法，求解过程直观简捷，便于实际应用。

2 公式的建立

假设某井以定流量 Q 进行抽水，持续进行 t_0 时间之后停止抽水，测定恢复水位，则时间 t 之后的剩余水位下降值 s，可以考虑为该井仍以流量 Q 继续抽水，并从停止抽水的时刻起有一个流量 Q 的虚拟注水井开始工作，这样正负流量相抵消，即可得到停止抽水后的水位降深效果。依据势的叠加原理，停止抽水后的剩余水位下降值 s 可按下式计算：

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\left[W\left(\frac{r^2S}{4Tt}\right)-W\left(\frac{r^2S}{4T\left(t-t_0\right)}\right)\right] \qquad (1)$$

式中：s－恢复水位过程中任一时间 t 观测孔的水位降深值（m）；Q－井的抽水流量（m^3/d）；T－导水系数（m^2/d）；S－储水系数；r－观测孔距主孔的距离（m）；t－从开始抽水算起的时间（d）；t_0－从开始抽水到停抽的时间（d）。

在式（1）中，因井函数的展开式为一收敛级数，

收稿日期：2007-06-01；**修订日期**：2007-10-01

作者简介：腾凯（1957－），男（汉族），黑龙江齐齐哈尔人，高级工程师.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且属超越方程，即：

$$W(u)=-0.5772-\ln u+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{n\cdot n!}(u)^n \qquad (2)$$

所以无法直接求解 S、T 或 μ 及 K 值，为此，笔者采用逐次逼近的优化拟合法，以标准剩余差最小为最优目标值，求得井函数的最优拟合替代式为(拟合过程略)：

$$W(u)=Au^{0.256}+Bu^{0.16}+C \qquad (3)$$

其中：A=18.109；B=-31.370；C=13.482

在适用范围内，即 0.0003≤u≤1.7，式(3)与式(2)的拟合精度见表 1 所示。由表 1 可见，替代函数式(3)与原函数式(2)的最大拟合误差不超过 4.6%，其中误差率小于 2.0%的点占全部计算点的 79.0%，式(3)具有较好的替代精度，完全可以满足实际工程的计算精度要求。

式(3)与式(2)的拟合精度比较　　表 1

u 值	式(2)值	式(3)值	误差%	u 值	式(2)值	式(3)值	误差%
0.0003	7.5348	7.1846	4.6	0.1	1.82290	1.82298	0
0.0005	7.0242	6.7721	3.6	0.4	0.70240	0.71241	1.4
0.001	6.3315	6.1840	2.3	0.6	0.45440	0.46312	1.9
0.005	4.7261	4.7083	0.4	0.8	0.31060	0.31576	1.7
0.01	4.03790	4.03788	0	1.1	0.18600	0.18623	0.1
0.03	2.95910	2.96164	0.1	1.4	0.11620	0.11489	1.1
0.06	2.29530	2.29506	0	1.7	0.07470	0.07611	1.9

将式(3)代入式(1)经进一步简化整理即可求得：

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\left[A\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.256}\left[\left(\frac{t_0}{t}\right)^{0.256}-\left(\frac{t_0}{t-t_0}\right)^{0.256}\right]+B\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.16}\left[\left(\frac{t_0}{t}\right)^{0.16}-\left(\frac{t_0}{t-t_0}\right)^{0.16}\right]\right] \qquad (4)$$

式(4)即为本文通过简化整理后推求含水层水文地质参数的基本公式。

3　参数的求解

在式(4)中，将等式的两端同时乘以 $\dfrac{1}{(t_0/t)^{0.16}-(t_0/(t-t_0))^{0.16}}$ 可以得到：

$$\frac{s}{(t_0/t)^{0.16}-(t_0/(t-t_0))^{0.16}}=\frac{AQ}{4\pi T}\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.256}\cdot\frac{(t_0/t)^{0.256}-(t_0/(t-t_0))^{0.256}}{(t_0/t)^{0.16}-(t_0/(t-t_0))^{0.16}}+\frac{BQ}{4\pi T}\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.16} \qquad (5)$$

设：$y=\dfrac{s}{(t_0/t)^{0.16}-(t_0/(t-t_0))^{0.16}}$，$x=\dfrac{(t_0/t)^{0.256}-(t_0/(t-t_0))^{0.256}}{(t_0/t)^{0.16}-(t_0/(t-t_0))^{0.16}}$

$$a=\frac{AQ}{4\pi T}\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.256},\quad b=\frac{BQ}{4\pi T}\left(\frac{r^2S}{4t_0T}\right)^{0.16} \qquad (6)$$

则式(5)可写为：

$$y=ax+b \qquad (7)$$

可以看出，式(7)为一自变量为 x，因变量为 y 的一元线性回归方程，而因变量 y 和自变量 x 表达式中含有欲求的含水层水文地质参数，因此，利用抽水试验数据通过 y、x 的对应关系，就可以采用线性回归的方法求得 a 和 b 值，从而求出含水层水文地质参数。

在式(6)中，设 $b_1=\dfrac{r^2S}{4T}$，$b_0=\dfrac{Q}{4\pi T}$，取 a/b 经整理可得：

$$b_1=\left(\frac{Ba}{Ab}\right)^{10.417} \qquad (8)$$

$$b_0=\frac{a}{b_1^{0.256}A}\quad 或\quad b_0=\frac{b}{b_1^{0.16}B} \qquad (9)$$

$$T=\frac{Q}{4\pi b_0} \qquad (10)$$

$$S=\frac{4b_1T}{r^2} \qquad (11)$$

4　算例

某承压井深度 946m，含水层厚度 60m(886m~946m)，以 Q=77.45m^3/h 抽水，抽至 372600s 时停泵，在距主孔 1450m 处的观测孔进行水位下降观测，其抽水资料见表 2 所示(选自文献[2])。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实测抽水降深资料　　表 2

观测时间 t(d)	4.313	4.865	5.198	5.865	6.198	6.865	7.198	7.865	8.198	8.865
水位降深 s(m)	4.021	3.809	3.451	2.870	2.657	2.326	2.106	1.916	1.797	1.686

根据上述已知参数，采用本文方法即可完成如下计算：

(1) 进行线性回归计算

利用文献[5]中给出的回归计算方法，通过编制 BASIC 语言由计算机完成计算，计算结果为：a=44.23，b=-79.99。

(2) 进行水文地质参数计算

将 a=44.23，b=-79.99 代入式(8)可求得 b_1 为：

$$b_1=\left(\frac{-31.370\times 44.23}{18.109\times(-79.99)}\right)^{10.417}=0.638$$

将 $b_1=0.637$ 代入式(9)即可求得 b_0 为：

$$b_0=\frac{44.23}{0.6387^{0.256}\times 18.109}=2.739$$

将 $b_0=2.739$ 代入式(10)即可求得 T 为：

$$T=\frac{77.45}{4\times 3.1416\times 2.739}=2.250\mathrm{m^2/h}=54.0\mathrm{m^2/d}$$

将 $T=54.0\mathrm{m^2/d}$ 代入式(11)即可求得 S 为：

$$S=\frac{4\times 0.6387\times 54.0}{1450^2}=6.56\times 10^{-5}$$

文献[2]采用降深-时间(s-lg$t$)量板法所得成果为：$T=56.4\mathrm{m^3/d}$，$S=6.14\times 10^{-5}$，可见，本文方法与文献[2]的计算成果比较接近，本文方法是可靠的。

5 结语

(1) 本文采用优化拟合的方法，在适用范围内对井函数进行了优化拟合，即当 $0.0003\leqslant u\leqslant 1.7$ 时，获得了具有较高替代精度的井函数替代式，为进一步简化求解水文地质参数创造了基本条件。

(2) 根据抽水试验资料采用线性回归的方法通过对待定系数的求解完成了水文地质参数的计算，有效提高了计算成果的精度，也使求解过程大大简化。

参 考 文 献

[1] 薛禹群等. 地下水动力学[M]. 北京：地质出版社，1986.

[2] 《供水水文地质手册》编写组. 供水水文地质手册[M]. 北京：地质出版社，1990.

[3] 刘兆昌，朱昆. 供水水文地质[M]. 北京：地质出版社，1979.

[4] 滕凯，胡秀华. 利用水位恢复期的降深比值求解水文地质参数的解析法[J]. 工程勘察，1996，(4).

[5] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京：原子能出版社，1990.

(上接第 39 页)

4 结语

(1) 本文利用 ANSYS 有限元软件对降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性模拟分析，得出了泥岩边坡在降雨入渗条件下的稳定性规律。

(2) 本文对降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性模拟分析的方法只是一种尝试，其目的是为工程的应用提供一定的理论依据，所以还有待于进一步研究。

(3) ANSYS 软件将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合，具备了完善的分析功能，同时拥有良好的用户界面和二次开发功能，为边坡稳定非线性分析提供了丰富的选项，因此 ANSYS 软件在边坡稳定分析中是个很好的工具。

参 考 文 献

[1] 南京大学数学系计算数学组. 偏微分方程数值解法[M]. 北京：科学出版社，1979，96~119.

[2] 王国强. 实用工程数值模拟技术其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安：西北工业大学出版社，1999.

[3] 张信贵. 南宁第三系湖相沉积泥岩承载力研究[O]. 南宁：广西大学，1995.

[4] 吴起星. 广西第三系泥岩桩端承载力研究[O]. 南宁：广西大学，2002.

[5] 清华大学农田水利教研组. 非饱和土壤水分运动参数的测定[J]. 水文地质与工程地质，1982，(1)：10~15.

[6] 扬诗秀，雷志栋. 水平土柱入渗法测定土壤导水率. 水利学报，1991，(5)：1~7.

[7] 姜健飞，胡良剑等. 数值分析及 MATLAB 实验[M]. 北京：科学出版社，2004.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net