

# Using Excel to Calculate Hydrogeological Parameters for Unsteady Flow Pumping Tests

Jinlong Zhong

NewGround Environmental Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

Pumping tests are the most commonly used method to determine hydrogeological parameters, and the data obtained from the tests can be used to calculate aquifer parameters through different methods, each with its own advantages and limitations. In this paper, based on the unsteady flow model, Excel Solver is used to calculate hydrogeological parameters for pumping tests in different aquifers. It shows that the results obtained by Excel Solver are comparable in accuracy to mature methods, indicating that using Excel to calculate hydrogeological parameters for pumping tests is feasible and has potential for promotion in teaching and routine projects.

## Keywords

pumping test; unsteady well flow model; hydrogeological parameters; Excel

## 利用 Excel 计算非稳定流抽水试验的水文地质参数

钟金龙

新地环境科技(深圳)有限公司, 中国·广东深圳 518000

## 摘要

抽水试验是确定水文地质参数的最常用手段, 试验所得的数据可以通过不同的方法来计算含水层参数, 目前所用的方法都有着自身的优点与局限。论文基于非稳定井流模型, 利用Excel规划求解对不同含水层的抽水试验进行水文地质参数计算。结果表明: Excel规划求解与成熟方法计算结果接近, 精度相当, 说明Excel用于计算抽水试验的水文地质参数是可行的, 具有在教学和常规项目上推广的潜力。

## 关键词

抽水试验; 非稳定井流模型; 水文地质参数; Excel

## 1 引言

抽水试验是获取水文地质参数的常用手段, 目前利用抽水时间—降深过程数据计算水文地质参数的方法主要有三种, 分别是配线法、编程法和软件法。配线法是根据抽水时间—降深数据, 手工绘制实测曲线, 与理论曲线进行拟合, 然后选取某一点计算参数。这种方法简单易用, 但是受人为因素影响较大, 主观性强, 不同的人可能得到不同的结果。编程法是利用计算机语言编写算法, 如神经网络算法、鱼群算法以及黄金正弦算法等<sup>[1-3]</sup>, 然后借助算法对导入的实测数据进行参数反演。这种方法克服了主观性的缺点, 但是对编程能力的要求较高, 适用范围较小。软件法是购买使用专业的含水层试验分析软件, 如 Aquifer test<sup>[4]</sup>, 选取相应的模型直接自动配线求解参数。专业软件提供了优化程序和简便的操作界面, 但成本相对较高, 真正购买使用的人较少。为探求更简便、高效的水文地质参数求解方法, 论文将 Excel

与非稳定井流模型相结合, 借助其内置的规划求解模块反演抽水试验的含水层参数, 验证该方法的可行性。

## 2 非稳定井流模型

根据承压含水层完整井流模型, 在均质、各向同性的含水层进行定流量抽水时, 抽水影响范围内任一位置任一时刻的水位降深  $s$  可由 Theis 公式计算:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (1)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2)$$

其中,  $Q$  为抽水井的流量;  $T$  为承压含水层的导水系数;  $t$  为自抽水开始到计算时刻的时间;  $r$  为计算点到抽水井中心的距离;  $S$  为承压含水层的贮水系数。

为了便于计算, 通常将井函数  $W(u)$  展开为级数形式:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n \cdot n!} \quad (3)$$

## 3 目标函数与规划求解

水文地质参数的求解主要通过拟合抽水试验时间—降深数据从而获取最优的  $T$  和  $S$ , 基于此, 目标函数为:

【作者简介】钟金龙(1988—), 男, 中国广东信宜人, 硕士, 工程师, 从事土壤、地下水调查评估与治理修复研究。

$$E(T, \mu^*)_{min} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (s_{mj} - s_{cj})^2 \quad (4)$$

其中,  $N$  为降深记录总数;  $j$  为降深记录的序列号,  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $s_{mj}$  为观测井第  $j$  个实测降深;  $s_{cj}$  为对应时刻的计算降深。

Excel 中的规划求解, 是利用线性或非线性规划算法, 在一系列约束条件的情况下, 不断调整可变单元格, 使得一个或多个目标单元格达到最大值或最小值的优化工具。实际操作过程中, 设置  $E$  所在单元格取最小值为目标, 导水系数  $T$ 、贮水系数所在单元格为可变单元格, 求解方法可选择非线性 GRG 或演化算法, 一般情况下 GRG 所需计算时间更短。

#### 4 计算实例

算例 1 为河南省豫东黄河冲积平原商丘地区某县水源地承压含水层的一次非稳定流抽水试验数据<sup>[5]</sup>, 抽水井稳定流量为  $60\text{m}^3/\text{h}$ , 观测井距抽水井的距离为  $140\text{m}$ , 整个抽水过程持续了  $1185\text{min}$ 。经过 Excel 的规划求解, 可变单元格的最终数值即为所求水文地质参数, 其中导水系数  $T=193.38\text{m}^2/\text{d}$ , 贮水系数  $=0.00025$ , 同时可得到各个时刻的计算降深, 与实测降深的拟合如图 1 所示。

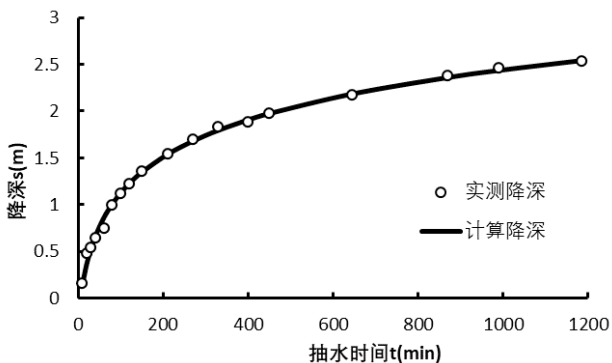


图 1 算例 1 计算降深与实测降深的拟合曲线

根据计算结果, 本次规划求解的目标函数值为  $0.00159$ , 其中早期  $10\text{min}$ 、 $20\text{min}$  以及  $60\text{min}$  的计算降深相对实测值偏差较大, 分别为  $5.73\%$ 、 $23.90\%$ 、 $14.76\%$ , 其余时刻的相对偏差均小于  $2\%$ , 推测是由于地下水流存在滞后现象, 初期流量不稳定使得抽水初期实际降深曲线与标准曲线不完全相符。总体而言, 计算值和实测值的变化趋势一致, 且大部分数值偏差较小, 平均相对偏差为  $3.86\%$ , 说明规划求解的结果是可靠的。

蒋辉<sup>[4]</sup>利用 Aquifer test 软件对上述算例进行了求解, 软件自动配线初步得到  $T=183\text{m}^2/\text{d}$ ,  $=0.000263$ , 随后通过专业判断在图形界面上移动曲线重新拟合, 以达到最优的配线效果, 最终得到  $T=196\text{m}^2/\text{d}$ , 值不变。人工配线法的结果为  $T=197.67\text{m}^2/\text{d}$ ,  $=0.000238$ 。Excel 求得的  $T$  值小于人工和软件配线的结果, 而值则介于两者之间。从原理上来讲, 人工配线与 Aquifer test 软件均属于标准曲线对比法, 专业软

件可有效提高计算的精度, 并且降低了人工配线的主观性和随意性。然而由于自动配线往往无法达到最优效果, 后期需要结合经验判断进行人工调整, 与之相比 Excel 的规划求解更具客观性。

谭璟等人<sup>[2]</sup>通过编程利用自适应人工鱼群算法对算例 1 进行求解, 该方法求得的结果与 Excel 规划求解完全相同, 目标函数  $E=0.00159$  也与 Excel 的计算结果一致。周有荣等人<sup>[3]</sup>利用黄金正弦算法针对本次抽水试验求得的  $T=219.59\text{m}^2/\text{d}$  为所有方法中的最大值, 而  $=0.00225$  则为所有对比方法中的最小值, 目标函数  $E=0.11131$ 。总体上自适应人工鱼群算法和 Excel 规划求解的拟合效果优于黄金正弦算法, 除了算法自身特征及相关参数设置外, 也与后者在计算过程中井函数直接使用近似公式有关。

编程法本质上与 Excel 规划求解相同, 都是对时间-降深过程曲线进行拟合, 其差异在于 Excel 中提供了现成的 GRG 和演化算法, 而编程法则需要通过掌握特定的计算机语言编写优化算法, 拟合效果主要受算法原理、参数设置、井函数公式等因素的影响。

通过以上对比分析可知, 利用 Excel 计算非稳定流抽水试验含水层参数是可行的, 求解结果与主流方法非常接近, 在具有相当精度的同时, 还有着客观性强、简单易用等特点, 完全能满足常规项目的应用需求。

#### 5 计算拓展

Theis 模型是最基础的非稳定井流模型, 为验证 Excel 规划求解在其他非稳定井流模型的适用性, 本文分别针越流含水层 Hantush 模型以及潜水含水层 Boulton 模型的相关算例进行了求解。

##### 5.1 越流含水层 Hantush 模型

算例 2 为文献<sup>[6]</sup>记录的一次越流含水层抽水试验, 抽水流量为  $17.0\text{m}^3/\text{min}$ , 观测井与抽水井的距离为  $12.19\text{m}$ 。Excel 规划求解过程中井函数采用第一类越流系统模型的 Hantush 公式, 相应的可变单元格需增加一个变量  $1/B$ , 即越流补给因子, 最终求得  $T=2.30\text{m}^2/\text{d}$ ,  $=0.0379$ ,  $1/B=0.00282$ , 目标函数  $E=0.00604$ , 实测降深与计算降深的平均相对偏差为  $0.60\%$ 。文献<sup>[7]</sup>用粒子群优化算法 (PSO) 来计算该次抽水试验的参数, 并与配线法进行比较。其中粒子群优化算法求得  $T=2.29\text{m}^2/\text{d}$ ,  $=0.0377$ ,  $1/B=0.00282$ , 人工配线法结果为  $T=2.17\text{m}^2/\text{d}$ ,  $=0.0400$ ,  $1/B=0.00328$ 。

经对比, 人工配线法的导水系数最小而有最大的贮水系数和越流补给因子。Hantush 模型中不同的越流因子会对应不同的标准曲线, 人工配线法需要将实测数据标记于透明双对数纸上, 然后在有限的标准曲线簇中选择并进行拟合, 而粒子群优化算法和 Excel 规划求解都相当于用无数条标准曲线来与实测数据进行匹配拟合, 越流因子有更高的细分程度, 从而更接近实际情况。粒子群优化算法与 Excel 规划求

解的结果更为接近,越流补给因子完全相同,与算例1中自适应人工鱼群算法的情况类似,粒子群优化算法和 Excel 计算的目标函数分别为 0.00608 和 0.00604,相差非常小。实践证明规划求解同样适用于越流含水层非稳定井流模型的参数反演,内置算法的拟合效果与常见的优化算法不相上下甚至更为出色。

## 5.2 潜水含水层 Boulton 模型

算例3为文献<sup>[8]</sup>记录的一次潜水含水层抽水试验,抽水量  $0.9\text{m}^3/\text{min}$ ,持续时间 40h50min,观测孔距离水井 10m,高瑞忠<sup>[1]</sup>根据 Boulton 第二潜水井流模型,基于 FORTRAN 语言分别利用加速遗传算法(AGA)和自适应神经网络算法(A-BP)求解水文地质参数。最终加速遗传算法求得  $T=1.147\text{m}^2/\text{d}$ ,  $\alpha=0.228$ ,  $\beta=0.035$ ,  $\gamma=0.00146$ ,神经网络算法结果为  $T=0.974\text{m}^2/\text{d}$ ,  $\alpha=0.306$ ,  $\beta=0.076$ ,  $\gamma=0.00250$ ,与之对比的配线法  $T=1.170\text{m}^2/\text{d}$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $\beta=0.046$ ,  $\gamma=0.0015$ 。潜水含水层的非稳定井流模型复杂度远高于承压含水层,本文借鉴其近似计算方法编写了 VBA 井函数,增加疏干因素 D 以及给水度  $\mu$  作为可变单元格并进行规划求解。Excel 规划求解最终求得  $T=1.216\text{m}^2/\text{d}$ ,  $\alpha=0.185$ ,  $\beta=0.025$ ,  $\gamma=0.00146$ ,目标函数为 0.0000664。

Excel 的计算结果中,  $T$  为所有方法的最大值,  $r/D$  和则小于其他求解方法,与加速遗传算法完全相同,小于配线法和自适应神经网络算法。配线法假定远大于,然后针对不同  $r/D$  值的标准曲线分前后期进行配线,计算过程同样受到有限标准曲线和人为因素的制约。加速遗传算法与自适应神经网络算法使用了相对偏差之和作为目标函数,所得结果对应的平均相对偏差分别为 3.12% 和 5.66%,文献[1]认为自适应神经网络算法精度不佳主要是受到网络结构和样本数目等因素的影响。本文使用相对偏差之和作为目标函数再进行规划求解所得结果并未发生变化,平均相对偏差为 1.62%,说明该结果的收敛性较好,不会受目标函数的变化影响。总体而言,除了平均相对误差偏大的神经网络算法外,其他三种方法求得的参数都较为接近,由此可见 Excel 规划求解可用于较复杂的潜水含水层参数计算,并保持着精度高、客观性强的优点。

## 6 结论

论文基于常见的含水层抽水试验求参方法与非稳定井流模型,探讨了 Excel 用于计算水文地质参数的可能性,并结合相关算例进行验证,得到以下结论。

① Excel 在承压含水层、越流含水层以及潜水含水层等含水层抽水试验的求参结果与其他成熟方法接近,3个算例的平均相对偏差在 0.60%~3.86% 之间,计算降深与实测降深拟合较好,说明利用 Excel 规划求解计算水文地质参数是可行的。

② 与传统的人工配线法相比, Excel 规划求解避免了人为主观因素的影响,并突破标准曲线的数量限制,能够更细致的刻画不同参数下的取值,具有拟合精度相对较高的优势。

③ Excel 规划求解与经人工专业判断调整后 Aquifer test 软件的计算结果更为接近,说明在抽水试验的参数反演中 Excel 基本能够达到专业软件的水平且客观性更强。

④ Excel 规划求解与编程法在求解水文地质参数上总体思路是相同的,拟合效果主要受算法原理、参数设置、井函数公式等因素的影响,在具体算例中, Excel 内置算法与自适应人工鱼群算法、加速遗传算法等优化算法精度相当,从可得性和易用性方面来看, Excel 在教学与常规项目上具有较大的推广潜力。

## 参考文献

- [1] 高瑞忠.加速遗传算法和自适应人工神经网络模型在地下水系统计算中的应用研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
- [2] 谭璟,张永祥,张大胜,等.基于自适应人工鱼群算法的含水层参数确定[J].人民长江,2018,49(S1):71-74+80.
- [3] 周有荣,李娜,周发辉.黄金正弦算法在水文地质参数优化中的应用[J].人民珠江,2020,41(6):117-120+128.
- [4] 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.
- [5] 地质部水文地质工程地质技术方法研究队.水文地质手册[M].北京:地质出版社,1978.
- [6] U.S.Department of the Interior (USDI).Groundwater manual [M]. Washington,D.C.: Bureau of Reclamation, 1981.
- [7] 张鹤志,郭建青.粒子群优化算法在确定越流含水层参数中的应用[J].水利水电科技进展,2011,31(3):13-16.
- [8] 李俊亭,王愈吉.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1987.