

求解黄土含水层水文地质参数的流量-时间配线法

张学真, 常安定

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要 利用基于割离井法的流量-时间配线法反求抽水过程黄土含水层水文地质参数, 并与裘布依公式法、割离井公式法的求解结果进行对比。计算结果表明, 黄土含水层水文地质参数的求解选用流量-时间配线法求解精度高, 可以减少繁琐的计算, 结果是可靠的。根据稳定流井流理论, 抽水过程观测孔的水位降深值 S 和观测孔到主井的距离的对数 $\lg r$ 存在一定的关系。利用 Dpp 软件包的图像处理功能, 对实测点据在平面内进行拟合, 确定了抽水井影响半径为 172 m, 确定了抽水过程 $Q-S$ 、 $q-S$ 关系曲线方程。

关键词 黄土含水层; 水文地质参数; 抽水试验; 流量-时间配线法; 补给半径

中图分类号: P641.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)01-0025-03

Discharge-time curve fitting method for calculating hydrogeological parameters in loess aquifer

ZHANG Xue-zhen, CHANG An-ding

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The discharge-time curve fitting method based on the isolated well method was used to calculate the hydrogeological parameters in the process of pumping. Compared with the Dupuit Equation and isolated well method, the results of the new method are more accurate and reliable, and its solution process is simpler. According to steady well flow theories, the water table decline at the observation well, S , has a certain relationship with the logarithm of the distance between the observation well and the main well, $\lg r$, in the pumping process. By plane fitting of the measured data using an image processing function of the software Dpp, it is found that the influence radius of the pumping well is 172 m. The $Q-S$ and $q-S$ curves in the pumping process are also presented.

Key words: loess aquifer; hydrogeological parameter; pumping test; discharge-time curve fitting method; influence radius

1 问题的提出

潜水含水层水文地质参数的反求主要采用裘布依公式法逆算, 也有借用承压含水层水文地质求参方法^[1]。对于潜水含水层渗流计算的求解, 割离井法^[2]巧妙地解决了潜水含水层抽水过程中的准边界问题, 和传统的裘布依公式法相比, 计算结果的精度得到提高^[2-4]。但是, 割离井法求解参数计算复杂, 计算过程常常令人望而生畏。虽然割离井法的计算机求解工作已经完成^[5-6], 参数反求也得到了一些成果^[3-4, 7], 但这些已有结果的推广使用同样也存在计

算复杂、语言编程难度大等问题。

本文借鉴泰斯法的配线法、直线图解法求参思路, 通过使用割离井法反求水文地质参数的流量-时间配线法求解黄土含水层抽水过程的水文地质参数, 分析对比不同方法用于求解黄土含水层抽水过程水文地质参数的计算精度问题, 为反求水文地质参数做进一步探索。

2 基本原理

2.1 井流函数

根据割离井法的基本内涵, 即含水层在垂直方

向无补给来源,抽水时井内水位趋于稳定时,均质潜水含水层中渗流过程可以看做是割离井渗流型,井的出(灌)水量公式为^[1]

$$Q(t) = 4\pi K h_0 S_0 \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\lambda_n^2 \beta t} \quad (1)$$

其中

$$S_0 = H_0 - h_0$$

$$\beta = a/R_0^2$$

$$B_n = \frac{J_0^2(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n x_0) - J_1^2(\lambda_n)}$$

式中: H_0 为含水层的初始厚度, m; h_0 为井水位在忽略水跃值 Δh 时即为井的动水位, 此处取常数, m; t 为抽水时间, d; x_0 为相对井径, $x_0 = r_0/R$ (r_0 为抽水井半径, m); R_0 为抽水井影响半径, m; a 为水力传导系数, m^2/d ; K 为渗透系数, m/d ; λ_n ($n = 1, 2, \dots$) 为 $F(\lambda, x) = J_0(\lambda x)Y_1(\lambda) - J_1(\lambda)Y_0(\lambda x) = 0$ 的解; $J_0(x)$, $J_1(x)$, $Y_0(x)$, $Y_1(x)$ 分别为第一类零阶、一阶和第二类零阶、一阶贝塞尔(Bessel)函数。

令 $u = e^{-\lambda^2 \beta t}$, 则式(1)变为

$$Q = 4\pi K h_0 S_0 \sum_{n=1}^{\infty} B_n u^{\lambda_n^2} \quad (2)$$

再令

$$W(u) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n u^{\lambda_n^2} \quad (3)$$

则式(1)简化为

$$Q = 4\pi K h_0 S_0 W(u) \quad (4)$$

式(3)中的 $W(u)$ 仅与相对井径 x_0 有关, $W(u)$ 可作为理论曲线, 称 $W(u)$ 为割离井法流量公式的井流函数。

2.2 基于割离井法的流量-时间配线法

整理式(4)易得

$$\ln Q = \ln 4\pi K h_0 S_0 + \ln W(u) \quad (5)$$

对 $u = e^{-\lambda^2 \beta t}$ 两边取对数, 得:

$$\ln t + \ln \beta = \ln \ln \frac{1}{u} \quad (6)$$

对具体的抽水试验可视 K, β, h_0, S_0 为常数, 则式(5)式(6)可变为

$$\ln Q = \ln W(u) + C_1 \quad (7)$$

$$\ln t = \ln \ln \frac{1}{u} + C_2 \quad (8)$$

其中: $C_1 = \ln 4\pi K h_0 S_0$, $C_2 = -\ln \beta$ 为常数。

由式(7)和式(8)知: 当绘制 $\ln Q \sim \ln t$ 关系曲线时, 就相当于绘制 $\ln W(u) + C_1 \sim \ln \ln(1/u) + C_2$ 关系曲线, 或者说, 曲线 $\ln Q \sim \ln t$ 与 $\ln W(u) \sim \ln \ln(1/u)$ 形状相同, 仅是纵横坐标各差一常数 C_1 和 C_2 。因而, 可以通过流量-时间配线求取参数。

先在双对数纸上做出 $W(u) \sim \ln(1/u)$ 理论曲线, 纵坐标为 $W(u)$, 横坐标为 $\ln(1/u)$, 将不同时

期的抽水量与时间关系曲线绘制在另一张透明双对数纸上, 纵坐标为出水量 Q , 而横坐标为时间 t 。最后两图重叠于移动, 直至透明纸上的曲线尽可能与 $W(u) \sim \ln(1/u)$ 理论曲线部分相重合。在两曲线重合的部分选取一个适宜的点, 并记下对应于该点的 $W(u)$, $\ln(1/u)$, Q 和 t 的值, 将 $W(u)$ 和 Q 的值代入式(4), 可得:

$$K = \frac{Q}{4\pi h_0 S_0 W(u)} \quad \beta = \frac{\ln \frac{1}{u}}{t} \quad (9)$$

$$a = \beta R_0^2 \quad \mu = \frac{K h_p}{a} = \frac{K(H_0 + h_0)}{2a} \quad (10)$$

3 实例研究

3.1 抽水试验设计

抽水试验场地选在渭南市辛市镇北 1000 m 处。抽水井为农用水井, 开孔直径 40 mm, 井深 35 ~ 45 m, 开采含水层主要为上更新统及中更新统黄土层。抽水试验为多落程的稳定流抽水试验。以抽水井为中心, 垂直和平行地下水流动方向正交布置了 2 组观测孔(图 1)。整个试验过程主井出水量 Q 、观测孔出水量 q 、水位降深 S 历时曲线见图 2。

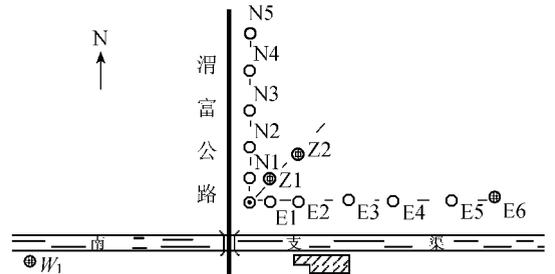


图 1 抽水试验平面布置

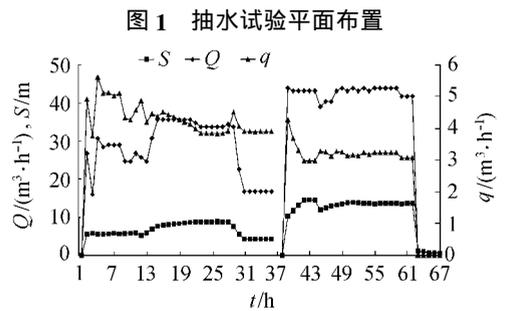


图 2 抽水过程 Q, q, S 历时关系曲线

设计抽水过程分为 2 个阶段。第 1 阶段 15 h, 抽水井水位变化较小。停抽恢复 8 h 进行第 2 阶段 24 h 抽水, 开采量增大, 井水位降幅增大。最后再恢复观测 10 h, 在恢复过程中观测孔水位降幅如果出现负值, 可以检验某些部位是否存在补给量。

3.2 试验数据分析

试验过程初期, 试验井降水漏斗扩展速度较快, 后期趋于缓慢。试验井降水漏斗的扩散范围除了与试验井水头有关外, 主要取决于抽水时间的长短及抽水量。图3是以抽水过程为例的 $Q \sim t$ 散点图与理论曲线 $W(u) \sim \ln(1/u)$ 的拟合图。在图3的重合曲线上取定点 $W(u)$ 、 $\ln(1/u)$ 、 Q 和 t 的值, 代入式(9)式(10)可求得水文地质参数 K 、 μ 。

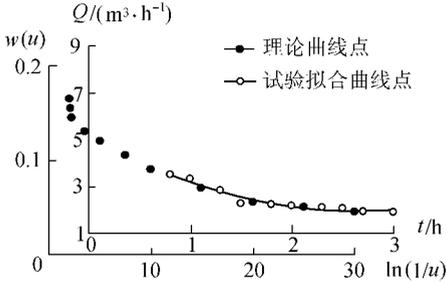


图3 抽水过程的理论曲线 $\ln W(u) \sim \ln(1/u)$ 和 $Q \sim t$ 关系曲线的拟合

裘布依公式法、割离井公式法、流量-时间配线法计算的本例2个过程水文地质参数列于表1中。

表1 不同方法得出的抽水过程水文地质参数

参数	裘布依公式法	割离井公式法	流量-时间配线法
K	3.501	2.632	2.559
μ	0.274	0.186	0.178

分析表1可知, 使用流量-时间配线法求得的抽水过程的水文地质参数 K 、 μ 与割离井公式法求解结果相近。因此, 可以认为流量-时间配线法值得使用, 计算过程也大大得到简化。

3.3 补给半径的确定

根据稳定流井流理论, 抽水时观测孔的水位降深 S 和观测孔到主井的距离的对数 $\lg r$ 存在一定的关系, 据此, 可以用作图法确定影响半径。利用 Dpp 软件包的图像处理功能, 对本案实测点据在平面内进行拟合, 结果如图4所示。

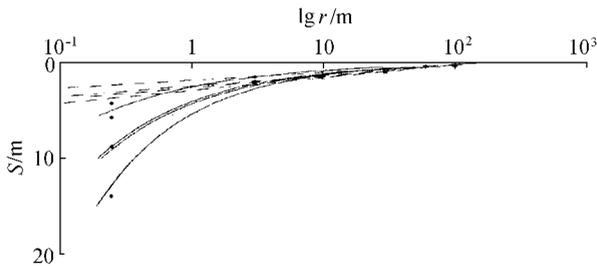


图4 试验场抽水井 $S \sim \lg r$ 关系曲线

图4中从上而下拟合曲线分别是 N1、N2、N3、N4 观测井水位降深。另一方向的观测值发现有侧向补给而不予采用。易知当抽水井出水流量分别为 $16.74 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $28.98 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $33.77 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $43.92 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 影响半径 R_y 和主井降深 S 的关系式依次为

$$R_y = 145.139e^{-1.700S} \quad R_y = 162.311e^{-1.931S}$$

$$R_y = 164.441e^{-2.735S} \quad R_y = 172.019e^{-2.091S}$$

计算易知, 不同流量的 $S \sim \lg r$ 拟合曲线在 $S = 0$ 时分别交 r 于 145 m、163 m、164 m 和 172 m 处。这一结果正好说明, 随着抽水量的不断增大, 抽水井的影响半径将相应增大, 本案中影响半径建议取值 172 m。

由于本次试验现场条件有限, 包括水跃值的影响在内的干扰因素比较多。从 $Q \sim S$ 、 $q \sim S$ 关系曲线的点据分布来看, 还有一定程度的分散。经过线性、抛物性、指数性、幂函数性的拟合发现, 在不考虑极端条件时, $Q \sim S$ 有 2 条比较接近的拟合曲线:

$$Q = 20.917 \ln S - 10.882 \quad (11)$$

$$Q = 5.319S^{0.85} \quad (12)$$

同样 $q \sim S$ 拟合曲线也有 2 条:

$$q = 5.423e^{-0.0389S} \quad (13)$$

$$q = -0.146S + 5.221 \quad (14)$$

按点据分布的均匀性和均方差最小原则, 最后选取式(11)式(13)为最佳拟合曲线。

4 结论

a. 黄土含水层水文地质参数的求解选用流量-时间配线法可以减少繁琐的计算, 结果是可靠的。

b. 本案试验结果显示, 抽水过程观测孔的水位降深 S 和观测孔到主井的距离的对数 $\lg r$ 存在一定的关系, 利用 Dpp 软件包的图像处理功能, 对实测点据在平面内进行拟合, 确定了抽水井影响半径为 172 m, 确定了抽水过程 $Q \sim S$ 、 $q \sim S$ 关系曲线方程。

参考文献:

- [1] 西北农学院, 华北水利学院. 地下水利用 [M]. 北京: 水利出版社, 1981: 69-71.
- [2] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析法 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 116-144.
- [3] 魏小妹, 李佩成. 利用“割离井法”确定水文地质参数的图解法 [J]. 地下水, 1993(4): 141-143.
- [4] 常安定. 级数的截断误差和割离井法的计算机实现 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2003: 159-180.
- [5] 李佩成. 测算潜水含水层渗透系数的“割离井法” [J]. 西北农学院学报, 1981(4): 57-70.
- [6] 张艳杰. 地下水“隔离井法”计算的微机实现 [J]. 西安公路交通大学学报, 1997(3): 37-40.
- [7] 李佩成, 卢玉东, 张艳杰, 等. 再论渗流计算的割离井法及其微机实现 [J]. 灌溉排水, 1998(1): 1-4.

(收稿日期 2007-08-09 编辑: 傅伟群)