

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.015

定降深井流试验求解水文地质参数的解析法

李 华¹, 滕 凯²

(1. 黑龙江省北部引嫩工程管理处, 黑龙江 大庆 163000; 2. 齐齐哈尔市水务局, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 用定降深井流试验求解水文地质参数为涉及3个未知数的超越方程, 常规的解析法无法直接获解。现有的试算法、标准曲线比对法及直线图解法或是依赖图表计算过程繁复, 或是应用受限计算误差大, 不便实际工程应用。采用优化拟合方法, 在工程适用参数范围内, 用较为简单的函数实现了对定降深井流流量函数的替代, 并利用流量比值关系经整理获得了可直接完成参数求解的一元二次方程, 计算过程简捷, 便于实际工程应用。

关键词: 定降深井流试验; 水文地质参数; 优化拟合; 解析计算

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0082-04

Analytical Method for Solving Hydrogeological Parameters by Setting Down Deep Well Flow Test

LI Hua¹, TENG Kai²

(1. Nenjiang Project Management Office in Northern Heilongjiang Province, Daqing, Heilongjiang 163000, China;

2. Qiqihar Municipal Water Affairs Bureau, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: Using deep drop flow test solution of hydrogeological parameters involves three unknown parameters thus it is a transcendental equation, which means it can not be solved directly by using the conventional analytical method. Existing methods such as trial method, standard curve comparison method and linear graphic method or dependency graphs, the process of which is quite complicated therefore their applications is limited, their results also have relatively large error. In this paper, the optimal fitting method was proposed to determine parameters within the reasonable range, a relatively simple function was adopted to set down deep flow function, and the flow ratio was transformed and a quadratic equation with one unknown parameters was obtained which can be easily solved, and the calculation process is relatively simple and convenient to practical engineering application.

Keywords: steady and deep well flow test; hydro geological parameter; optimal fitting; analytical calculation

在生产实践中, 由于试验井的抽水流量易于控制及计量, 通常均采用定流量抽水试验法获取水文地质参数, 但在许多情况下, 采用定降深井流试验更能达到多快好省地测定含水层水文地质参数的目的。如承压含水层的自流井和疏排底板水的坑道放水孔等均属井中水头或降深保持不变, 出水流量随时间的增加而减少的定降深井流问题。由于定降深井流的流量函数由超越方程的零阶第一类及第二类贝塞尔函数组成, 无法通过解析法直接完成参数求解。目前, 工程上主要采用试算法、标准曲线比对法

及直线图解法^[1-4]完成参数求解。因试算法需通过多次重复计算, 且井的流量函数以数值形式通过表格给出, 每处计算均要通过查表取值确定, 计算过程十分繁复, 不便实际应用^[5]; 标准曲线比对法靠人工手动拟合, 实际工作不但受特制专门图表的束缚, 而且求解成果因曲线族的密度及比对过程人为因素的影响, 求解成果的精度难免存在误差^[6-7]; 直线图解法不但要求具有较长的抽水时间以满足该方法的使用条件, 而且要由人工读取相应的特征点数据(截距及斜率), 显然, 参数计算结果受试验时长、相关曲线

收稿日期: 2016-01-27

修稿日期: 2016-02-16

基金项目: 齐齐哈尔市科技攻关项目(NYGG201301)

作者简介: 李 华(1962—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 主要从事水利工程施工技术管理方面的研究。E-mail: lhde@163.com

通讯作者: 滕 凯(1957—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师, 主要从事水利防灾减灾及工程优化设计研究。E-mail: tengkai007@163.com

绘制及数据读取精度的直接影响,难免出现误差^[8]。因此,提出一种更加简单适用的求解定降深井流条件下水文地质参数的计算方法十分必要。

本文采用优化拟合方法^[9-12],对定降深井流条件下隐含待求参数的流量函数进行了拟合替代,并根据流量比值关系,通过整理推导获得了求解相关水文地质参数的一元二次方程,由该方程可非常简捷地完成参数求解,计算过程简单直接,便于实际工程应用。

1 公式的建立

1.1 基本计算公式

由地下水动力学可知,假定含水层为均质、等厚、各向同性、无越流存在的承压含水层,在定降深井流条件下(见图 1 所示),地下水非稳定流的微分方程及初始条件和边界条件为:

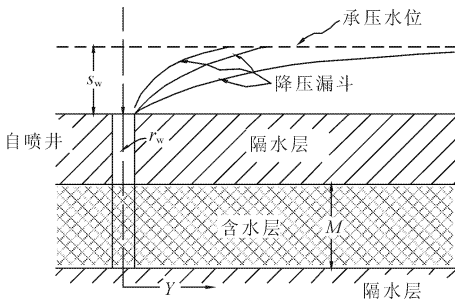


图 1 无越流承压含水层定降深井流

$$\begin{cases} \alpha \left(\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} \right) = \frac{\partial s}{\partial t} & r_w < r < \infty, t > 0 \\ s(r, 0) = 0 & r_w < r < \infty \\ s(\infty, t) = 0 & t > 0 \\ s(r_w, t) = s_w (\text{常数}) & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

解方程(1)可得到井的流量计算公式为:

$$Q = 2\pi T s_w G(f) \quad (2)$$

$$G(f) = \frac{4f}{\pi} \int_0^\infty x e^{-f \cdot x^2} \left\{ \frac{\pi}{2} + \text{tg}^{-1} \left[\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right] \right\} dx \quad (3)$$

$$f = \frac{\alpha \cdot t}{r_w^2} \quad (4)$$

式中: Q 为抽水(或放水)流量, m^3/d ; s_w 为主井抽水(或放水)引起的降深, m ; $G(f)$ 为无越流系统定降深井流的无量纲流量函数; r_w 为井孔(或放水孔)的半径, m ; T 为含水层的导水系数, m^2/d ; α 为含水层的压力传导系数, m^2/d ; t 为抽水(或放水)持续时间, d ; f 为无量纲时间; $J_0(x)$ 为零阶第一类贝塞尔函数; $Y_0(x)$ 为零阶第二类贝塞尔函数。

由于 $G(f)$ 的计算十分复杂,工程上均通过表格

给出与 f 相对应的 $G(f)$ 的函数值,如文献[1]表 5-5-1。

根据抽水(或放水)试验观测资料可完成实测流量与时间的关系曲线,即为 $Q-t$ 曲线。在 $Q-t$ 曲线上分别选取 $A、B$ 两点,即为 $(Q_A, t_A)、(Q_B, t_B)$,将其分别代入式(2)可得:

$$Q_A = 2\pi T s_w G\left(\frac{\alpha \cdot t_A}{r_w^2}\right) \quad (5)$$

$$Q_B = 2\pi T s_w G\left(\frac{\alpha \cdot t_B}{r_w^2}\right) \quad (6)$$

设 $Q_{AB} = \frac{Q_A}{Q_B}$,则由方程式(5)、式(6)可得:

$$Q_{AB} G\left(\frac{\alpha \cdot t_B}{r_w^2}\right) = G\left(\frac{\alpha \cdot t_A}{r_w^2}\right) \quad (7)$$

式中: Q_{AB} 为与抽水历时 $t_A、t_B$ 相对应的流量比值。

由式(7)即可采用试算法求得定降深井流条件下的水文地质参数 α ,并用下式求出 T 值:

$$T = \frac{Q_A}{2\pi T s_w G\left(\frac{\alpha \cdot t_A}{r_w^2}\right)} \quad (8)$$

或:
$$T = \frac{Q_B}{2\pi T s_w G\left(\frac{\alpha \cdot t_B}{r_w^2}\right)} \quad (9)$$

1.2 简化解析公式

1.2.1 参数的适用范围

由文献[13]可知,压力传导系数的域值范围一般为 $10^4 \text{ m}^2/\text{d} < \alpha < 10^7 \text{ m}^2/\text{d}$,在实际抽水试验中,抽水的控制时间一般为 $5 \text{ min} (0.0035 \text{ d}) < t < 4500 \text{ min} (3.0 \text{ d})$,井孔的半径一般为 $0.05 \text{ m} < r_w < 0.15 \text{ m}$,由此可求得无量纲时间 f 的域值范围为 $1.5 \times 10^3 < f < 1.2 \times 10^{10}$ 。为了使本文计算公式具有更宽的适用范围,满足实际工程可能遇到的特殊情况要求,特将参数 f 的域值范围外延至 $1 \times 10^2 < f < 7 \times 10^{10}$ 。

1.2.2 流量函数的拟合

根据文献[1]表 5-5-1 可绘制公式(3)的 $G(f) - \ln f$ 关系曲线,见图 2 所示。

依据 $G(f) - \ln f$ 曲线特点,在工程的适用参数范围内(即 $1 \times 10^2 \leq f \leq 7 \times 10^{10}$),本着拟合替代函数在表达形式上要体现最简化、在数值拟合上要实现高精度、在参数求解上要具备可直接获解的确定原则,笔者选取了多个类似线型的拟合替代备选函数(限于篇幅,具体备选函数形式略),采用优化拟合方法,并以标准剩余差最小为目标函数^[12-13],即为:

$$S = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n [G'(f) - G(f)]^2 / (n-1)}$$

式中: S 为标准剩余差; $G'(f)$ 为理论计算值 $G(f)$ 的近似替代值; n 为拟合计算的数组数。

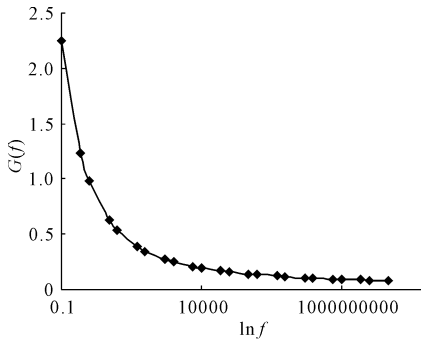


图 2 $G(f) - \ln f$ 关系曲线

表 1 式(10)替代式(3)精度比较

f	$G(f)$		误差 / %	f	$G(f)$		误差 / %
	式(3)值	式(10)值			式(3)值	式(10)值	
1×10^2	0.3460	0.3370	2.59	5×10^6	0.1227	0.1222	0.41
3×10^2	0.2940	0.2918	0.74	7×10^6	0.1202	0.1197	0.41
5×10^2	0.2740	0.2740	0.00	1×10^7	0.1177	0.1172	0.43
7×10^2	0.2630	0.2632	-0.08	3×10^7	0.1106	0.1101	0.43
1×10^3	0.2510	0.2525	-0.60	5×10^7	0.1076	0.1072	0.41
3×10^3	0.2220	0.2237	-0.78	7×10^7	0.1057	0.1053	0.38
5×10^3	0.2100	0.2122	-1.05	1×10^8	0.1037	0.1034	0.28
7×10^3	0.2030	0.2051	-1.06	3×10^8	0.0982	0.0981	0.14
1×10^4	0.1964	0.1981	-0.87	5×10^8	0.0958	0.0958	0.00
3×10^4	0.1777	0.1789	-0.67	7×10^8	0.0943	0.0944	-0.08
5×10^4	0.1701	0.1711	-0.58	1×10^9	0.0924	0.0929	-0.57
7×10^4	0.1654	0.1662	-0.52	3×10^9	0.0883	0.0888	-0.58
1×10^5	0.1608	0.1614	-0.39	5×10^9	0.0864	0.0870	-0.76
3×10^5	0.1479	0.1481	-0.13	7×10^9	0.0851	0.0859	-0.99
5×10^5	0.1426	0.1426	0.00	1×10^{10}	0.0838	0.0848	-1.21
7×10^5	0.1393	0.1392	0.08	3×10^{10}	0.0801	0.0815	-1.85
1×10^6	0.1360	0.1358	0.18	5×10^{10}	0.0785	0.0802	-2.17
3×10^6	0.1266	0.1262	0.33	7×10^{10}	0.0774	0.0793	-2.49

根据替代函数的选取原则,经分别对各备选函数的优化拟合及分析比选(具体推求过程略),最终确定流量函数的最优替代式为:

$$G'(f) = \exp(af^{-0.12} + bf^{-0.06} + c) \quad (10)$$

其中: $a = 0.562515, b = 2.151166, c = -3.043088$

在本文分析确定的工程适用参数范围内(即为 $1 \times 10^2 \leq f \leq 7 \times 10^{10}$),利用 $[G'(f) - G(f)]/G(f) \times 100\%$ 即可完成式(10)替代式(3)的相对误差计算,结果见表 1 所示。

由表 1 可见,利用式(10)替代式(3)的最大替代相对正、负误差分别为 2.59% 和 -2.49%,且均发生在 f 的域值端点,其中相对误差小于 1.0% 的点占全部计算点的 81%。可见,式(10)具有较好的替代精度,可以满足实际工程的计算精度要求。

1.2.3 简化解析式的建立

将式(10)替代式(9)并分别代入式(6)、式(7),经进一步整理可得:

$$\frac{a}{r_w^{-0.24}}(t_A^{-0.12} - t_B^{-0.12})\alpha^{-0.12} + \frac{b}{r_w^{-0.12}}(t_A^{-0.06} - t_B^{-0.06})\alpha^{-0.06} - \ln Q_{AB} = 0 \quad (11)$$

$$\text{设: } A = \frac{a}{r_w^{-0.24}}(t_A^{-0.12} - t_B^{-0.12}) \quad (12)$$

$$B = \frac{b}{r_w^{-0.12}}(t_A^{-0.06} - t_B^{-0.06}) \quad (13)$$

则式(11)可写为:

$$A\alpha^{-0.12} + B\alpha^{-0.06} - \ln Q_{AB} = 0 \quad (14)$$

由式(14)可解得参数 α 为:

$$\alpha = \left(\frac{\sqrt{B^2 + 4A \ln Q_{AB}} - B}{2A} \right)^{-\frac{50}{3}} \quad (15)$$

α 求出后即可由式(7)或式(8)求得 T 值,并由下式求出 μ_e 值。

$$\mu_e = \frac{T}{\alpha} \quad (16)$$

式中: μ_e 为承压水的弹性给水度。

2 算例及结果验证

1971 年 10 月 1 日山东省地矿局第一地质队在西尚庄地区 zk7 孔做了一次定降深放水试验, 试验层为奥陶系马家沟灰岩承压含水层, 厚度 86 m, 放水

孔进水段半径 $r_w = 0.055$ m。放水前水位高出地面 7.43 m, 放水历时 8 h, 观测数据列于表 2。

利用该实例资料采用本文方法完成相关水文地质参数计算, 并与现有计算方法所求得的结果进行比较, 以验证本文方法计算精度的可靠性。

表 2 山东省西尚庄地区 zk7 孔定降深放水试验观测数据

观测时间 (h:min)	累计时间 /min	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$		降深 s_w/m	
		观测数据	修正曲线数据	观测数据	修正曲线数据
09:30	30				
09:30	60	15.37	15.39	6.45	6.51
10:30	120	14.91	14.90	6.50	6.51
11:00	150	14.68	14.73	6.51	6.51
11:30	180	14.68	14.63	6.51	6.51
14:00	330	14.25	14.28	6.54	6.51
14:30	360	14.25	14.24	6.54	6.51

根据表 2 绘制 $Q - t$ 关系曲线(见图 3), 并在修正后的 $Q - t$ 关系曲线上选取 A、B 两个点, 即为: $t_A = 120$ min, $Q_A = 14.90$ L/s; $t_B = 330$ min, $Q_B = 14.29$ L/s。

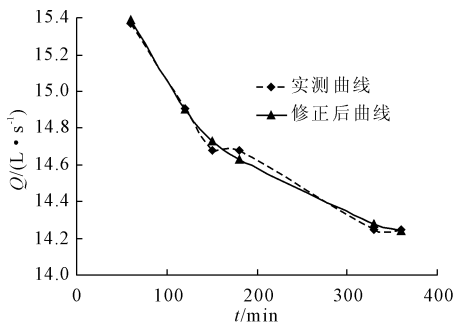


图 3 $Q - t$ 关系曲线

依据上述已知参数可求得: $Q_{AB} = 1.042684$, $A = 0.043194$, $B = 0.103828$ 。将 A、B 及 Q_{AB} 代入式(15)可求得:

采用文献[1]介绍的直线图解法可得: 直线斜率 $m = 8.333 \times 10^{-5}$ d/m², 截距 $(\frac{1}{Q})_0 = 6.07 \times 10^{-4}$ d/m², 则:

$$\alpha = 0.445 r_w^2 10^{(1/Q)_0/m} = 3.73 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$T = \frac{0.183}{m s_w} = 337.3 \text{ m}^2/\text{d}, \mu_e = 9.04 \times 10^{-6}$$

可见, 本文方法所求结果与采用直线图解法所得结果非常接近, 其中: 参数 α 、 T 及 μ_e 各值的相对误差仅为 0.21%、0.53% 及 0.33%, 本文方法具有较好的求解精度。

3 结 语

本文针对定降深井流试验求解水文地质参数存在的问题, 通过对流量函数的拟合替代, 基于流量比值关系, 获得了可直接完成水文地质参数求解的简化计算公式, 实例计算及分析表明, 本文方法较好地解决了目前现有计算方法存在的问题, 不但计算过程直观简捷, 而且具有较高的求解精度, 便于实际工程推广应用。

为了有效提高计算成果的精度, 考虑个别流量观测成果可能存在误差, 在利用本文方法计算前, 可根据 $Q - t$ 的观测成果完成 $Q - t$ 曲线绘制, 并通过 $Q - t$ 曲线修正相关流量 Q 值。

本文采用优化拟合技术解决了对复杂流量函数的高精度简化替代, 实现了利用定降深试验资料求解水文地质参数的简化解析计算, 该方法对简化求解类似试验求参问题无疑提供了一条有效途径。

(下转第 101 页)

$$\alpha = \left(\frac{\sqrt{B^2 + 4A \ln Q_{AB}} - B}{2A} \right)^{-\frac{50}{3}} = 3.738 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{d}$$

由式(4)得:

$$f = \frac{\alpha \cdot t}{r_w^2} = 1.02975 \times 10^9$$

将 f 代入式(10)可求得 $G'(f) = 0.092815$, 则由式(8)、式(16)可分别求得:

$$T = \frac{Q_A}{2\pi s_w G\left(\frac{\alpha \cdot t_A}{r_w^2}\right)} = 339.1 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$\mu_e = \frac{T}{\alpha} = 9.07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{d}$$

参考文献:

- [1] 毛祖熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
- [3] 煤炭部地质勘探研究所水文地质室邯邢课题组.用定降深井流试验确定均质各向同性含水层水文地质参数的方法[J].煤田地质与勘探,1977(3):61-70.
- [4] 聂庆林,高广东,轩华山,等.抽水试验确定承压含水层参数方法探讨[J].水文地质工程地质,2009,36(4):37-40,49.
- [5] 滕凯.稳定流抽水试验求解越流参数新方法[J].工程勘察,2015,43(5):39-42.
- [6] 肖长来,梁秀娟,崔建铭,等.确定含水层参数的全程曲线拟合法[J].吉林大学学报(地球科学版):2005,35(6):751-755.
- [7] 李伟,赵燕容,朱旭芬,等.自动配线法求水文地质参数的优化路径法研究[J].勘察科学技术,2013(2):6-10.
- [8] 郭建青,李彦,王洪胜,等.分析供水边界含水层抽水试验数据的新方法[J].水利学报,2006,37(7):807-812.
- [9] 刘刚,滕凯.梯形断面均匀流水深的近似计算公式[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):41-44.
- [10] 谢成玉,滕凯.抛物线形断面渠道均匀流水深的近似计算公式[J].水电能源科学,2012,30(7):94-95,172.
- [11] 雷加欣,滕凯.六圆弧蛋形断面共轭水深的简化计算[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):151-154.
- [12] 李华,滕凯.消力池池深的简捷计算法[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):220-223.
- [13] 薛凤海.压力传导系数物理意义及其应用探讨[J].内蒙古农牧学院学报,1987,8(3):120-125.
- [14] 阎凤文.测量数据处理方法[M].北京:原子能出版社,1988.
- [15] 王慧文.偏最小二乘回归法及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.