

间断性阶梯抽水试验求解水文地质参数解析法

滕 凯

(齐齐哈尔市水务局,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要:针对利用间断性阶梯流量抽水试验资料求解水文地质参数采用试算法、特殊标准曲线对比法及线性回归法等存在的计算过程繁复、人为误差难免、图表束缚严重等问题,采用优化拟合方法,在工程适应参数范围内,通过对以级数表示的泰斯井函数的简单函数替代,并依据抽水试验降深时间关系曲线上的选点,采用降深比值法,经对间断性阶梯流量抽水井流函数的整理推导,获得了可直接完成相关水文地质参数求解的一元二次方程,求解过程简捷直观,便于实际工程应用。精度分析表明,在工程适用参数范围内,最大相对误差小于 2%,完全满足实际工程的计算精度要求。

关键词:间断性阶梯抽水;水文地质参数;优化拟合;水位降深比值;解析算法

中图分类号:TV211.12

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)02-0059-05

利用抽水井的抽水试验资料确定试验区的水文地质参数是水文地质评价的一项基本工作,而在众多的抽水试验方法中,由于单井抽水试验具有方便快捷、费用相对较低、求解方法相对简单等优点,在实际工作得到比较广泛的应用。由于单井抽水试验受抽水机械设备及人为等其他因素影响比较敏感,实际抽水试验很难保证定流量不间断连续抽水,其波动幅度往往超过规定的允许值,并由此而形成间断性阶梯流量抽水试验情况,也同时提出了对利用间断性阶梯流量抽水试验资料求解水文地质参数方法的研究。为了获得该种井流条件下含水层参数的求解方法,相关学者开展了大量的研究工作,并获得了相关研究成果。截至目前,已提出的利用阶梯或间断性阶梯流量抽水试验求解含水层水文地质参数的方法主要有特定标准曲线对比法^[1]、近似计算法^[2-3]、线性回归法^[4]、Nash-Sutcliffe 效率系数精度评价法^[5]及智能算法^[6]。这些方法有效推进了该种井流条件求解含水层参数的研究工作,但尚存在一些不足。例如:特定标准曲线对比法由于需通过 3 条以上理论与实测降深曲线的反复比对分析,不但过程复杂,而且存在图上对比时的人为误差;近似算法虽然可通过解析法直接完成参数求解,但由于限定井函数自变量 $u \leq 0.01$ (最大相对误差为 0.2%) 或 $u \leq 0.1$ (最大相对误差为 5.3%),适用范围受限或相对误差较大,不

便实际应用;线性回归法计算过程繁复,需人工读取截距,难免存在人为误差,并且存在受个别点的误差影响较大问题;Nash-Sutcliffe 效率系数精度评价法不但适用范围有限(拟合分析时取泰斯井函数展开式的前 3 项,当 $u=0.35$ 时,近似值为 0.8226,与真值 0.7942 的相对误差为 3.6%)。因此,该方法的适用范围仅为 $u \leq 0.35$,致使抽水试验的前期(当 t 较小时)或试验中出现阶梯流量初期(当 $t-t_i$ 较小时)的观测资料在拟合分析中不得被剔除),而且存在待求参数初值选取的盲目性及双参数若干次调整并完成精度比较的繁复性;智能算法由于计算边界条件严格,运算时存在优化路径的选择、计算函数梯度、收敛速度及迭代次数等复杂计算环境,对应用者的基本技能要求较高,基层工作应用尚存在问题。

为有效简化利用间断性阶梯流量抽水试验资料求解水文地质参数的获解方法,提高计算结果精度,笔者依据优化拟合理论,经逐次逼近拟合,实现了用一个比较简单的函数完成了对泰斯井函数的高精度替代,并依据在抽水试验所获得的降深~时间关系曲线上选取两个降深点的比值关系,通过整理推导得到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。

收稿日期:2016-01-10

基金项目:齐齐哈尔市科技攻关项目(NYGG201301)

作者简介:滕凯(1957-),男,黑龙江齐齐哈尔人,高工,主要从事水利防灾减灾及工程优化设计研究。E-mail:tengkai007@163.com

1 公式的建立

1.1 基本计算公式

在含水层符合泰斯井流条件下,根据降深迭加原理即可获得单井采用间断性阶梯流量抽水情况下含水层任意一点的水位降深为:

$$\begin{aligned} s &= \frac{Q_1-Q_0}{4\pi T} W(u_1) + \frac{Q_2-Q_1}{4\pi T} W(u_2) + \dots + \frac{Q_n-Q_{n-1}}{4\pi T} W(u_n) \\ &= \frac{Q_1-Q_0}{4\pi T} W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right] + \frac{Q_2-Q_1}{4\pi T} W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t-t_1)}\right] + \\ &\quad \dots + \frac{Q_n-Q_{n-1}}{4\pi T} W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t-t_{n-1})}\right] \\ &= \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^n (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t-t_{i-1})}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $Q_0=0, t_0=0, \alpha=\frac{T}{S}, u=\frac{r^2}{4\alpha t}$

式中: s 为距抽水井距离为 r 的观测孔在抽水时间为 t 时的水位降深, m; r 为观测孔到抽水井的距离, m; Q_i 为抽水井 t_{i-1} 到 t_i 时段的抽水流量, m³/d; $W(u_i)$ 为泰斯井流函数; u_i 为井函数自变量; t_i 为第 i 阶梯的抽水开始时间, d; $i=1, 2, \dots, n$; n 为阶梯流量抽水的阶梯数; T 为含水层的导水系数, m²/d; α 为含水层的压力传导系数, m²/d; S 为含水层的储水系数。

根据间断性阶梯流量抽水试验观测资料可完成实测水位降深与时间的关系曲线, 即为 $s \sim t$ 曲线。在 $s \sim t$ 曲线上分别选取 A 、 B 两点, 即为 $(s_A \sim t_A)$ 和 $(s_B \sim t_B)$, 将其分别代入式(1)可得:

$$s_A = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^n (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_A-t_{i-1})}\right] \quad (2)$$

$$s_B = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^m (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_B-t_{i-1})}\right] \quad (3)$$

其中: $t_n < t_A, t_m < t_B$

将式(2)与式(3)相比, 并设 $s_{AB} = \frac{s_A}{s_B}$, 经整理可得:

$$\begin{aligned} s_{AB} &= \frac{\sum_{i=1}^m (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_B-t_{i-1})}\right]}{\sum_{i=1}^n (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_A-t_{i-1})}\right]} \\ &= \sum_{i=1}^m (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_A-t_{i-1})}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

在式(4)中, $W(u_i)$ 为超越方程, 可通过设定不同的 α , 当等式两边相等时, 所设 α 值即为所求, α 求出后即可用下式求得 T 值:

$$T = \frac{1}{4s_A\pi} \sum_{i=1}^n (Q_i-Q_{i-1}) W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_A-t_{i-1})}\right] \quad (5)$$

1.2 简化计算公式

1.2.1 泰斯公式的拟合

假设含水层均质各向同性、等厚、侧向无限延伸、产状水平; 天然状态下水力坡度为零; 水流服从达西定律; 水头下降引起的地下水储量的释放是瞬间完成的。此种条件下的定流量非稳定流承压水完整井的地下水井流模型可用泰斯井函数表示为:

$$W(u_i) = -\ln u_i - 0.5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n \cdot n!} (u_i)^n \quad (6)$$

为避免利用式(4)求解必需采用试算之繁, 现对式中的泰斯井函数进行以下拟合替代。

依据式(6)可绘制 $W(u_i) \sim u_i$ 曲线, 根据 $W(u_i) \sim u_i$ 曲线特点, 在工程的适用参数范围内 (即 $2 \times 10^{-7} \leq u_i \leq 0.6$), 假设 $W'(u_i)$ 可替代 $W(u_i)$, 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^[7-8], 即为:

$$Z = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n [W'(u_i) - W(u_i)]^2 / (n-1)}$$

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

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), 最终确定泰斯井函数的最优拟合替代式为:

$$W'(u_i) = A u_i^{0.16} + B u_i^{0.08} + C \quad (7)$$

其中: $A=18.76, B=-44.294, C=25.672$

在 $2 \times 10^{-7} \leq u_i \leq 0.6$ 范围内, 利用 $[W'(u_i) - W(u_i)] / W(u_i) \times 100\%$ 即可完成式(7)替代式(6)的相对误差计算, 结果见表1所示。由表1可见, 式(7)的最大替代相对误差为 3.31%, 且发生在的值域端点, 其他各点的相对误差均小于 3.0%, 其中相对误差小于 2.0% 的点占全部计算点的 87%。可见, 式(7)具有较好的替代精度, 可以满足实际工程的计算要求。

1.2.2 简化公式的建立

将式(4)中的 $W(u_i)$ 用式(7)替代, 经进一步整理可得:

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{s_{AB} r^{0.32} A}{4^{0.16}} \left[(Q_1-Q_0) \left(\frac{1}{t_B-t_0} \right)^{0.16} + (Q_2-Q_1) \left(\frac{1}{t_B-t_1} \right)^{0.16} + \dots + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (Q_m-Q_{m-1}) \left(\frac{1}{t_B-t_{m-1}} \right)^{0.16} \right] \right\} \frac{1}{\alpha^{0.16}} + \left\{ \frac{s_{AB} r^{0.16} B}{4^{0.08}} \left[(Q_1-Q_0) \left(\frac{1}{t_B-t_0} \right)^{0.08} + \right. \right. \end{aligned}$$

表1 式(7)替代式(6)精度比较

Table1 Comparison of the accuracy between formula (6) and formula (7)

W(u)				W(u)			
u _{xy}	式(6)值	式(7)值	误差 / %	u _{xy}	式(6)值	式(7)值	误差 / %
2×10 ⁻⁷	14.8477	14.3668	-3.24	7×10 ⁻⁴	6.6879	6.7679	1.20
3×10 ⁻⁷	14.4423	14.0483	-2.73	1×10 ⁻³	6.3315	6.3954	1.01
5×10 ⁻⁷	13.9314	13.6371	-2.11	3×10 ⁻³	5.2349	5.2477	0.24
7×10 ⁻⁷	13.5950	13.3604	-1.72	5×10 ⁻³	4.7261	4.7176	-0.18
1×10 ⁻⁶	13.2383	13.0619	-1.33	7×10 ⁻³	4.3916	4.3711	-0.46
3×10 ⁻⁶	12.1397	12.1097	-0.25	1×10 ⁻²	4.0279	4.0071	-0.51
5×10 ⁻⁶	11.6289	11.6506	0.18	3×10 ⁻²	2.9591	2.9175	-1.40
7×10 ⁻⁶	11.2924	11.3426	0.44	5×10 ⁻²	2.4679	2.4335	-1.39
1×10 ⁻⁵	10.9357	11.0115	0.69	7×10 ⁻²	2.1508	2.1251	-1.20
3×10 ⁻⁵	9.8371	9.9629	1.28	1×10 ⁻¹	1.8229	1.8086	-0.78
5×10 ⁻⁵	9.3263	9.4617	1.45	2×10 ⁻¹	1.2227	1.2301	0.61
7×10 ⁻⁵	8.9889	9.1272	1.53	3×10 ⁻¹	0.9057	0.9182	1.38
1×10 ⁻⁴	8.6332	8.7692	1.57	4×10 ⁻¹	0.7024	0.7105	1.16
3×10 ⁻⁴	7.5348	7.6475	1.50	5×10 ⁻¹	0.5598	0.5580	-0.32
5×10 ⁻⁴	7.0242	7.1182	1.34	6×10 ⁻¹	0.4544	0.4393	-3.31

$$(Q_2-Q_1)\left(\frac{1}{t_B-t_1}\right)^{0.08}+\cdots+(Q_m-Q_{m-1})\left(\frac{1}{t_B-t_{m-1}}\right)^{0.08}\left\{\frac{1}{\alpha^{0.08}}+\right.$$

$$\alpha=\left(\frac{1}{y}\right)^{12.5} \tag{15}$$

$s_{AB}CQ_m=\left\{\frac{r^{0.32}A}{4^{0.16}}\left[(Q_1-Q_0)\left(\frac{1}{t_A-t_0}\right)^{0.16}+(Q_2-Q_1)\left(\frac{1}{t_A-t_1}\right)^{0.16}+\right.\right.$
 $\left.\left.\cdots+(Q_n-Q_{n-1})\left(\frac{1}{t_A-t_{n-1}}\right)^{0.16}\right]\right\}\frac{1}{\alpha^{0.16}}+\left\{\frac{r^{0.16}B}{4^{0.08}}\left[(Q_1-Q_0)\left(\frac{1}{t_A-t_0}\right)^{0.08}+\right.\right.$
 $\left.\left.(Q_2-Q_1)\left(\frac{1}{t_A-t_1}\right)^{0.08}+\cdots+(Q_n-Q_{n-1})\left(\frac{1}{t_A-t_{n-1}}\right)^{0.08}\right]\right\}\frac{1}{\alpha^{0.08}}+CQ_n$

α 求出后即可利用式(5)求得 T 值,并由下式求得含水层的储水系数 S 为:

$$S=\frac{T}{\alpha} \tag{16}$$

1.2.3 计算点的选取原则及方法

由式(9)~(11)可见,式中除其他已知参数外均含有降深比值 s_{AB} ,即所选 A 、 B 两点 s_A 与 s_B 的比值,为有效保证利用上述公式求解参数的精度,可按以下原则及方法完成计算点的选取:

(1)为有效消除观测孔的水位降深观测误差,在选点前,应根据观测孔的降深时间观测数据完成 $s\sim t$ 曲线绘制,并对 $s\sim t$ 曲线进行修正,剔除个别点的观测误差影响。

(2)在实际工程中,为了获得较好的试验观测结果,保证抽水试验对观测孔的降深产生明显影响,观测孔距抽水井的距离一般为 $10\text{m}<r<30\text{m}^{[9]}$ 。根据现有研究成果^[10],压力传导系数 α 的值域范围为 $10^4\sim 10^7\text{m}^2/\text{d}$ 。由此可得,只要所选计算点的时间满足 $\{(t_A-t_{i-1}), (t_B-t_{i-1})\}>50\text{min}$ 的抽水历时要求(即选取水位降深曲线或水位恢复曲线初期以外的点),即可保证井函数自变量 u_i 的值域在 $2\times 10^{-7}\leq u_i\leq 0.6$ 范围内。

(3)为充分利用试验曲线的不同线形及所选计算点的良好代表性,应尽量将 A 、 B 两点分别选在 $s\sim t$ 曲线的水位降深曲线段和水位恢复曲线段上(如算例中的 A 、 B 点),也可分别选在不同的水位降深曲线段(如

算例中的A、C点)或不同的水位恢复曲线段上。

(4)考虑选取每组(两个点)数据的不同所求参数可能略有不同,为进一步提高参数求解精度,实际工作中可依据选点原则及方法选取2~3组数据完成求参计算,并取其平均值作为最终求参结果。

2 实例及比较

2.1 实例计算

抽水试验井位于某城郊北部的平原区,由周边已成井的钻孔资料可知,井位处岩性较为均一,上部普遍覆盖厚度为12~14 m的亚粘土层,静水位埋深7 m左右,含水层厚度为120~130 m,具有承压水性质。抽水试验井的井径为0.15 m,在距抽水井中心18 m处设一观测孔,抽水井开始抽水后在观测孔实施水位降深观测。共进行了两个阶梯流量的抽水试验,流量分别为: $Q_1=1\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $Q_2=2\,000\text{ m}^3/\text{d}$,试验过程采用间歇式阶梯流量抽水,试验过程为:1~600 min以 Q_1 流量抽水,600~1 800 min停泵恢复,1 800~3 000 min以 Q_2 流量抽水。获得的相关试验数据见表2所示。

根据观测孔的观测数据完成 $s\sim t$ 曲线(见图1),为说明本文方法的有效及适用性,在 $s\sim t$ 曲线上选取A、

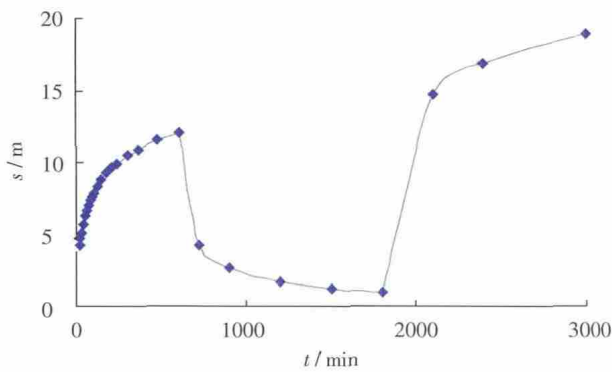


图1 实测 $s\sim t$ 曲线
Fig.1 The measured $s\sim t$ curve

B、C三点。考虑降水曲线的特点,将A、C两点分别选在与 Q_1 及 Q_2 抽水流量相对应的降深曲线上,将B点选在 Q_1 流量停泵后的恢复曲线上。有关数据见表3所示。

表3 计算选点数据
Table 3 The data for selecting point

项目	选点	A	B	C
观测时间 t/min		360	1200	2400
水位降深 s/m		10.86	1.665	16.808

先选取A、B两点的数据,依据本文公式即可求得 $s_{AB}=6.52252$, $A_1=-115732.66$, $B_1=141141.64$, $C_1=-38508.00$ 。将 A_1 、 B_1 、 C_1 代入式(14)可得:

$$y=\frac{-B_1+\sqrt{B_1^2-4A_1C_1}}{2A_1}=0.41211$$

则由式(15)及式(5)即可分别求得含水层的压力传导系数 α 及导水系数 T 为:

$$\alpha=\left(\frac{1}{y}\right)^{12.5}=6.5\times10^4\text{ m}^2/\text{d}$$

$$T=\frac{1}{4s_A\pi}\sum_{i=1}^n(Q_i-Q_{i-1})W\left[\frac{r^2}{4\alpha(t_A-t_{i-1})}\right]=51.89\text{ m}^2/\text{d}$$

采用同样方法也可完成选择A、C两点数据时, $s_{AC}=0.64612$, $A_1=-16220.94$, $B_1=19616.52$, $C_1=-5333.56$, $y=0.41279$, $\alpha=6.36\times10^4\text{ m}^2/\text{d}$, $T=51.64\text{ m}^2/\text{d}$ 。A、B及A、C两组所求参数 α 及 T 的相对误差分别为2.15%和0.65%,平均值为: $\alpha=6.43\times10^4\text{ m}^2/\text{d}$, $T=51.77\text{ m}^2/\text{d}$, $S=8.05\times10^4\text{ m}^2/\text{d}$ 。

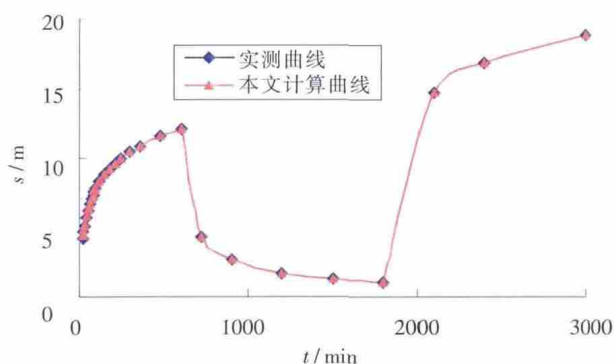
2.2 成果比较

根据本文所得参数,利用式(7)及式(1)即可完成相应的降深计算 $s\sim t$ 曲线,并与实测的降深 $s\sim t$ 曲线进行比较,见图2。

由图2可见,将本文方法所得参数的计算曲线与实测曲线比较,无论是针对两段降深过程曲线还是中部的降深恢复曲线段,本文计算与实测曲线几乎完全

表2 观测孔水位降深资料
Table2 The drawdown in observation hole

累计时间 t/min	降深 s/m	累计时间 t/min	降深 s/m	累计时间 t/min	降深 s/m
20	4.172	100	7.832	600	12.087
25	4.658	120	8.262	720	4.263
30	5.061	150	8.790	900	2.639
40	5.710	180	9.222	1200	1.665
50	6.220	210	9.589	1500	1.227
60	6.641	240	9.904	1800	0.974
70	6.998	300	10.423	2100	14.705
80	7.309	360	10.860	2400	16.808
90	7.585	480	11.551	3000	18.872

图2 $s \sim t$ 曲线比较Fig.2 Comparison of $s \sim t$ curve

吻合,可以说明本文方法具有较好的求解精度,可在实际工程中推广使用。

3 结语

本文通过对阶梯(或间歇式)流量抽水井流函数中泰斯公式的优化拟合替代,解决了超越方程求解问题,并依据降深比值关系,实现了直接完成该种抽水试验条件下水文地质参数的求解。所获得的计算公式表达形式简单,求解过程不受图表束缚,避免了图表取值的人为误差及反复进行标准曲线比对的舍取之繁。

本文所提及的简化解析算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。

参考文献:

- [1] 陈崇希,林敏. 地下水动力学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. (CHEN Chongxi, LIN Min. Groundwater Dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 沈炳鑫,储兆君. 采用阶梯状流量抽水试验资料估算含水层参数[J]. 水文地质工程地质, 1983,(5):19-23. (SHEN Bingxin. CHU Zhaojun. Estimation of aquifer parameters by means of step flow pumping

- test data [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 1983,(5):19-23. (in Chinese))
- [3] 肖湘峰. 利用任意阶梯抽水试验资料求解含水层参数的通用方法[J]. 水文地质工程地质, 1985,(1):42-46. (XIAO Xiangfeng. General method for solving the parameters of aquifer using arbitrary step pumping test data [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 1985, (1):42-46. (in Chinese))
- [4] 周新国. 分析阶梯流量井流试验数据的线性回归法[J]. 中国农村水利水电, 1997,(10):11-13. (ZHOU Xinguo. Linear regression analysis of the test data of the step flow well test [J]. China Rural Water and Hydropower, 1997,(10):11-13. (in Chinese))
- [5] 邱淑伟,梁秀娟,肖常来,等. 间断性阶梯状抽水试验求参[J]. 节水灌溉, 2015,(5):60-62+65. (QIU Shuwei, LIANG Xiujuan, XIAO Changlai, et al. Parameters determination for intermittent step-pumping tests [J]. Water Saving Irrigation, 2015,(5):60-62+65. (in Chinese))
- [6] 刘兴伟,邵景力. 基于遗传算法的阶梯流量抽水试验及反演水文地质参数方法研究 [J]. 工程勘察, 2014,(9):51-55. (LIU Xingwei, SHAO Jingli. Study on step pumping test inversion of hydrogeological parameters based on genetic algorithm method [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2014,(9):51-55. (in Chinese))
- [7] 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. (WANG Huiwen. Partial Least Squares Regression Method and Its application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [8] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1988. (YAN Fengwen. Measurement and Data Processing Method [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988. (in Chinese))
- [9] SL320-2005, 水利水电工程钻孔抽水试验规程 [S]. (SL320-2005, Regulations of Water Resources and Hydropower Engineering Drilling Pumping Test [S]. (in Chinese))
- [10] 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. (XUE Fenghai. Going thortier into the physical meaning and application of hydraulic diffusivity [J]. Journal of Inner Mongolia College of Agriculture & Animal Husbandry, 1987,8(3):120-125. (in Chinese))

How to Determine Hydrogeological Parameters Based on Discontinuous Step Pumping Test

TENG Kai

(Qiqihar Municipal Water Affairs Bureau, Qiqihar 161006, China)

Abstract: The optimum fitting method was used to make an alternative of Theis well function represented with series in an adaptive engineering parameters range. According to the selected points on the drawdown-time relationship curve of the pumping test, the drawdown ratio method was adopted to derivate the function of discontinuous step pumping flow, and obtain the solution of the quadratic equation in one unknown for hydrogeological parameters. The accuracy analysis show that the maximum relative error is less than 2% in the engineering application parameters, which can meet the requirement for the calculation accuracy in the actual engineering application.

Key words: discontinuous step pumping; hydro-geological parameter; optimization fitting; groundwater level drawdown ratio; analytical calculation method