

文章编号:1007-2284(2014)10-0056-05

改进直线解析法确定各向异性含水层参数的计算

蒋名亮^{1,2}, 韦佳¹, 郭建青¹, 陈小兵², 吴从稳^{2,3}, 卜凡敏⁴, 沈军辉⁵

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室
(烟台海岸带研究所), 山东 烟台 264003; 3. 烟台大学 生命科学学院, 山东 烟台 264005;
4. 山东省滨海盐碱地水土环境工程技术研究中心, 山东 东营 257500; 5. 山东省垦利县农业局, 山东 东营 257500)

摘要:为了拓宽直线解析法的应用范围,以便分析抽水试验数据,确定各向异性含水层参数,采用对井函数的级数展开式多保留一项的简化方式,建立了一种新的改进直线解析法。用正问题求逆的思路对其进行了可靠性的验证,并与Cooper-Jacob直线图解法的计算结果进行了对比,并进行了灵敏度分析。结果表明,改进直线解析法的计算结果与Cooper-Jacob直线图解法的非常相近;敏感性分析的结果则表明此方法对抽水试验数据具有的系统误差并不灵敏。与传统的Cooper-Jacob直线图解法相比,改进的方法具有更宽的适用条件,前者要求 $u < 0.05$ 而改进直线解析法仅要求 $u < 0.2$ 。

关键词:含水层参数;各向异性;井函数简化;数据分析方法

中图分类号:TV211.1+2 **文献标识码:**A

The Calculation of Anisotropy Aquifer Parameters by Improved Linear Analytical Method

JIANG Ming-liang^{1,2}, WEI Jia¹, GUO Jian-qing¹, CHEN Xiao-bing²,
WU Cong-wen^{2,3}, BO Fan-min⁴, SHEN Jun-hui⁵

(1. School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone
Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong Province, China;
3. College of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, Shandong Province, China; 4. Shandong Coastal
Saline Soil and Water Environment Engineering Research Center, Dongying, 257000, Shandong Province, China;
5. Shandong Kenli County Agricultural Bureau, Dongying 257500, Shandong Province, China)

Abstract: In order to broaden the applied range of linear analytical method, analysis pumping test data easily and confirm the hydro-geological parameters of an anisotropy aquifer, a new improved linear analytical method is established which adopts the simplification way that retains a more term of the thesis well functions' series expansion. And the thought of inversing the direct problem is used to check the reliability of the method, meanwhile, it is compared with the results of Cooper-Jacob linear graphic method, and at last a sensitivity analysis is made of the method. It turns out that the results calculated from the improved linear analytical methods is very similar to the results calculated from Cooper-Jacob linear graphic method and the result of sensitivity analysis shows that the improved linear analytical method is not sensitive to system error. Moreover, different from Cooper-Jacob linear graphic method, it has wider application condition, as the former needs $u < 0.05$ while the improved linear analytical method only asks for $u < 0.2$.

Key words: aquifer parameters; anisotropy; simplification of well function; the method of data analysis

收稿日期:2014-03-14

基金项目:公益性行业(海洋)科研专项(201105020);公益性行业
(农业)科研专项经费项目(200903001);中科院海岸研
究所部署项目“黄河三角洲陆海界面过程、生态演变与
修复技术”;国家科技支撑计划项目(2009BADA3B04)

资助。

作者简介:蒋名亮(1989-),男,硕士研究生,主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail:ghyza@126.com。

通讯作者:陈小兵(1974-),博士,副研究员,主要从事海岸带水土资源高效开发与农业可持续发展研究。E-mail:xbchen@yic.ac.cn。

0 引言

分析抽水试验数据和含水层特性是确定水文地质参数的重要内容。在大多数情况下,人们为了计算简便或是缩减工作量等各种原因常将各向异性含水层简化为各向同性进行计算,这样计算出来结果显然是不符合实际情况的。针对求解各向异性含水层参数的问题,半个世纪以来,国内外学者在这方面进行了大量的研究工作:在有越流补给的情况下 Hantush 导出了径向各向异性含水层中非完整井流三维问题的数学模型及相应的计算公式^[1];Papadopoulos 推导出各向异性含水层中非稳定井流的泰斯公式的表达式^[2];Way 在 1982 年给出了利用现场抽水试验数据计算出径向各向异性渗透系数主值的方法^[3];周志芳通过坐标轴的旋转、压缩变换提出一种基于抽水试验资料确定平面各向异性渗透系数主值和主方向的图解与优化相结合的半解析法^[4,5]。另一方面,分析非稳定流抽水试验数据计算含水层参数时常用的方法主要为标准配线法和 Cooper-Jacob 直线图解法^[6],这两种方法虽然简单方便,但前者在配线的过程中很大程度上存在人为的影响,而后者为获取较理想的直线要求主井与观测井间的距离较小,或是要求有抽水时间较长的观测数据。为了缩短抽水试验时间,拓宽直线解析法的适用范围,郭建青在 2008 年提出了一种改进的直线图解法^[7],该方法与 Cooper-Jacob 直线图解法所不同的是截取井函数级数展开式的前三项作为泰斯井函数的近似表达式,这样在满足与 Jacob-Cooper 直线图解法相同计算精度的条件下,仅要求无量纲时间变量的值 $u < 0.2$ 或 $u < 1.0$,范围远远大于 Jacob-Cooper 直线图解法所要求的 $u < 0.01$ 或 $u < 0.05$ 。

鉴此,文中引用文献^[7]中的思路,提出一种新的改进图直线解法,用以分析抽水试验数据,确定各向异性含水层参数。

1 基本公式

1.1 泰斯公式在各向异性下的解析表达式

设在无限延伸的承压含水层中,以定流量 Q 进行抽水,如果初始水头水平,则可以用如下形式的泰斯公式^[8]描述各向异性含水层中任一时刻任意一点处的水位降深 s :

$$s = \frac{Q}{4\pi T_e} W(u_{xy}) \quad (1)$$

式中: s 为水位降深, m; Q 为抽水井的抽水流量, m^3/min ; T_e 则可以定义为含水层的等效导水系数, m^2/min ,其定义为:

$$T_e = \sqrt{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2} \quad (2)$$

式中: T_{xx} 、 T_{yy} 和 T_{xy} 为导水系数在当地坐标系下的张量分量, m^2/min ; x 、 y 为当地坐标系的坐标分量, m; $W(u_{xy})$ 为与泰斯公式形式相同的井函数,其中无量纲时间为:

$$u_{xy} = \frac{s}{4t} \left(\frac{T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y}{T_e^2} \right) \quad (3)$$

对于当地坐标系中的第 i 个观测孔(位置坐标为 (x_i, y_i)) 的无量纲时间据式(3)可以写成:

$$u_i = \frac{s}{4t T_e^2} (T_{xx} y_i^2 + T_{yy} x_i^2 - 2T_{xy} x_i y_i) \quad (4)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

1.2 井函数的简化

泰斯井函数 $W(u_{xy})$ 可以用级数形式表示为^[6]:

$$W(u_{xy}) = -\ln u_{xy} - 0.5772 + u_{xy} - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{u_{xy}^n}{n \times n!} \quad (5)$$

在此,我们取前三项作为泰斯井函数的表达式,即:

$$W(u_{xy}) = -\ln u_{xy} - 0.5772 + u_{xy} \quad (6)$$

按这种方式对井函数进行简化,只要求 $u_{xy} \leq 0.2$ 或 1.0 就可以达到 Cooper-Jacob 直线图解法在 $u_{xy} \leq 0.01$ 或 0.05 时的精度^[7]。

根据公式(1),公式(4)和公式(6)可以将当地位置坐标为 (x, y) 处的观测孔在开始抽水后任一时刻 t_j (j 为不同观测时间的序列号)的水位降深 s_j 表示为:

$$s_j = \frac{Q}{4\pi T_e} \left[\ln \left(\frac{2.25 T_e^2}{S(T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y)} \cdot t_j \right) + \frac{s(T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y)}{4 T_e^2} \cdot \frac{1}{t_j} \right] \quad (7)$$

设在整个抽水试验过程中共观测 n 组水位降深数据 s_j ($j=1, 2, 3, \dots, n$), 则在整个抽水过程中,观测井的平均水位降深 \bar{s} 可以表示为:

$$\bar{s} = \frac{Q}{4\pi T_e} \left[\ln \left(\frac{2.25 T_e^2}{s(T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y)} \right) + \ln \left(\prod_{j=1}^n t_j \right)^{\frac{1}{n}} + \frac{s(T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y)}{4 T_e^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{t_j} \right] \quad (8)$$

利用公式(7)和公式(8)就可以建立用于计算含水层参数的直线方程。

1.3 直线方程组的建立及参数的计算公式

为了简化直线方程的表达式,我们令:

$$E = \left(\prod_{j=1}^n t_j \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

$$X_{1j} = \ln \frac{t_j}{c} \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cdot \frac{1}{t_j} \quad (11)$$

$$X_{2j} = \frac{1}{t_j} - F \quad (12)$$

$$Y_{1j} = \frac{s_j - \bar{s}}{x_{1j}} \quad (13)$$

$$Y_{2j} = \frac{s_j - \bar{s}}{x_{2j}} \quad (14)$$

$$Z_{1j} = \frac{x_{2j}}{x_{1j}} \quad (15)$$

$$Z_{2j} = \frac{x_{1j}}{x_{2j}} \quad (16)$$

$$A = \frac{Q}{4\pi T_e} \quad (17)$$

$$B = A \cdot \frac{s(T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} x y)}{4 T_e^2} \quad (18)$$

用式(7)减式(8),然后两边同时除以 X_{1j} 可以得到直线方程 1:

$$Y_1 = A \mid B \cdot Z_1$$

若两边同时除以 X_{2j} 则得到了直线方程 2:

$$Y_2 = A \cdot Z_2 + B$$

对观测数据按照公式(9)至公式(16)进行相应的转化,然

后利用直线图解法或线性回归法计算相应直线方程中的常数 A 和 B 。

将常数 A 代入方程(17)可求解出 T_e ：

$$T_e = \frac{Q}{4\pi A} \quad (19)$$

当我们具有三个观测孔的水位降深数据时,可根据(18)式建立一个以 (ST_{xx}) 、 (ST_{yy}) 、 (ST_{xy}) 为变量三元一次方程组：

$$y_i^2 \cdot (ST_{xx}) + x_i^2 \cdot (ST_{yy}) - 2x_i y_i \cdot (ST_{xy}) = \frac{4B_i T_e^2}{A_i}, i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

由上面这个方程组解出 (ST_{xx}) 、 (ST_{yy}) 、 (ST_{xy}) , 由(2)知, 可利用下式求得弹性释水系数 S ：

$$S = \sqrt{(ST_{xx})(ST_{yy}) - (ST_{xy})^2} / T_e \quad (21)$$

在求出 S 后, 根据 (ST_{xx}) 、 (ST_{yy}) 和 (ST_{xy}) 的值就可反推出 T_{xx} 、 T_{yy} 和 T_{xy} 。

在全局坐标系中, 导水系数张量的分量与当地坐标系下导水系数张量存在如下关系：

$$T_X = \frac{1}{2} [T_{xx} + T_{yy} + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}] \quad (22)$$

$$T_Y = \frac{1}{2} [T_{xx} + T_{yy} - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}] \quad (23)$$

当地坐标系与全局坐标系间的夹角则为：

$$\theta = \arctan\left(\frac{T_x - T_{yy}}{T_{xy}}\right) \quad (24)$$

将上面已求得的 T_{xx} 、 T_{yy} 和 T_{xy} 代入式(22)和式(23)中可计算出全局坐标系下的 T_X 和 T_Y , 最后利用式(24)可计算两个坐标系间的夹角 θ 值。

当 T_X 、 T_Y 已知时, 全局坐标系下的各向异性含水层的水位降深计算公式就可以表示为

$$s = \frac{Q}{4\pi \sqrt{T_X T_Y}} W(u_{xy}) \quad (25)$$

其中：

$$u_{XY} = \frac{s}{4t} \left(\frac{T_X Y^2 + T_Y X^2}{T_X T_Y} \right) \quad (26)$$

表2 直线1计算过程中的参数

Tab. 2 The calculation processes parameters of line 1

时间 t / min	X_{1i} 1	X_{2i} / min^{-1}	Z_{1i} / min^{-1}	Y_{1i1} / m	Y_{1i2} / m	Y_{1i3} / m
0.5	-4.118	1.794	-0.436	0.459	0.427	0.473
1	-3.425	0.794	-0.232	0.477	0.457	0.485
2	-2.732	0.294	-0.108	0.489	0.478	0.493
3	-2.326	0.128	-0.055	0.494	0.488	0.496
4	-2.039	0.044	-0.022	0.498	0.494	0.499
6	-1.633	-0.039	0.024	0.502	0.502	0.502
8	-1.346	-0.081	0.060	0.506	0.510	0.504
10	-1.122	-0.106	0.094	0.509	0.516	0.507
15	-0.717	-0.139	0.194	0.519	0.534	0.513
20	-0.429	-0.156	0.363	0.534	0.565	0.523
30	-0.024	-0.172	7.265	1.195	1.794	0.988
40	0.264	-0.181	-0.685	0.434	0.377	0.457

时间 t / min	X_{1i} 1	X_{2i} / min^{-1}	Z_{1i} / min^{-1}	Y_{1i1} / m	Y_{1i2} / m	Y_{1i3} / m
50	0.487	-0.186	-0.381	0.463	0.432	0.475
60	0.669	-0.189	-0.282	0.473	0.449	0.482
90	1.075	-0.195	-0.181	0.483	0.467	0.488
120	1.363	-0.197	-0.145	0.486	0.474	0.491
150	1.586	-0.199	-0.126	0.488	0.477	0.492
180	1.768	-0.200	-0.113	0.489	0.479	0.493
240	2.056	-0.202	-0.098	0.491	0.482	0.494
300	2.279	-0.202	-0.089	0.491	0.484	0.494
360	2.461	-0.203	-0.083	0.492	0.485	0.495
480	2.749	-0.204	-0.074	0.493	0.487	0.495
720	3.154	-0.204	-0.065	0.494	0.488	0.496

式中： X 和 Y 为全局坐标系下观测孔的位置坐标, m。

2 算例与讨论

本算例降深数据是由正问题设定的参数(表4)根据公式(1)和文献[9]中 R. Srivastava 提出的井函数近似表达式计算而得。算例条件如下：有一完整井在某正交各向异性含水层中以定流量 $Q=0.754\ 20\ \text{m}^3/\text{min}$ 做非稳定流抽水试验；以抽水井为坐标原点, 正东为 x 轴正向, 正北为 y 轴正向, 抽水井附近有3个观测孔 OW1、OW2 和 OW3, 它们的坐标分别为 (28.3, 0)、(9.0, 33.5) 和 (-19.3, -5.2)。抽水试验开始后, 3个观测孔地下水位降深随时间的变化在表1列出。

表1 抽水试验时间与降深数据

Tab. 1 The pumping time and the drawdown data

时间 t / min	降深 s /m			时间 t / min	降深 s /m		
	OW1	OW2	OW3		OW1	OW2	OW3
0.5	0.337	0.151	0.491	50	2.454	2.121	2.669
1	0.594	0.345	0.777	60	2.545	2.211	2.76
2	0.893	0.604	1.091	90	2.747	2.413	2.962
3	1.079	0.775	1.283	120	2.89	2.556	3.106
4	1.214	0.903	1.421	150	3.002	2.667	3.218
6	1.408	1.09	1.618	180	3.093	2.758	3.309
8	1.548	1.225	1.76	240	3.237	2.902	3.452
10	1.657	1.332	1.869	300	3.348	3.013	3.564
15	1.856	1.528	2.07	360	3.439	3.104	3.655
20	1.999	1.668	2.213	480	3.583	3.248	3.799
30	2.2	1.868	2.414	720	3.786	3.451	4.002
40	2.343	2.01	2.558				

2.1 参数计算与结果验证

利用公式(9)和公式(11)计算 E 和 F 的值分别为 30.720 50 和 0.205 74；与不同观测时间 t_j 对应的 X_{1j} 、 X_{2j} 、 Y_{1ij} 、 Z_{1j} 、 Y_{2ij} 、 Z_{2j} ($i=1, 2, 3$) 可分别应用公式(10)、(12)、(13)、(14)、(15)、(16)求得, 直线1参数 X_{1j} 、 X_{2j} 、 Y_{1ij} 、 Z_{1j} ($i=1, 2, 3$) 的计算值可见表2。

在图 1 中可以看出当抽水时间 $t < 2 \text{ min}$ 时,三个观测井的无量纲时间 u 并非全小于 0.2,在进行参数求解时当舍去抽水时间小于 2 min 的降深数据。然后将重新计算得到的 Y_{1ij} 、 Z_{1j} ($i=1,2,3$)按直线方程 1, Y_{2ij} 、 Z_{2j} ($i=1,2,3$)按直线方程 2 分别做一元线性回归分析(相应的线性回归参数见表 3),将线性参数代入方程组(20)即可计算解得各项含水层参数(表 4)。为了说明文中方法的可靠性,同时按照文献[10]中的 Cooper-Jacob 直线图解法对含水层参数进行了计算,其计算结果在表 4 中给出。通过比较不难发现,直线方程 1 和 2 得到的结果非常接近;同时与正问题设定的含水层参数进行对比也可以发现文中方法计算结果是比较精确的,从而可以说明本文使用的改进直线解析法在满足适用条件下计算得到的结果是可靠的。

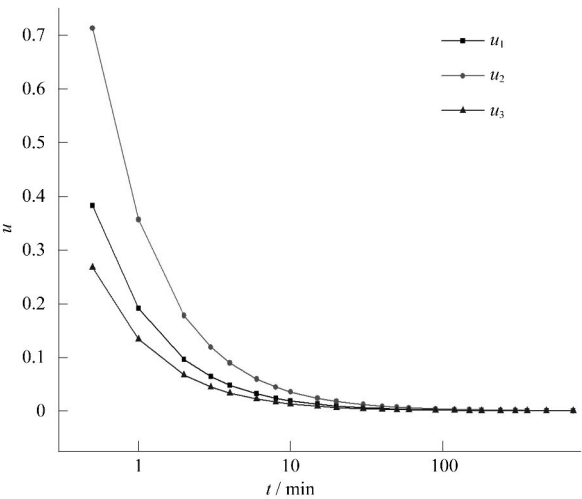


图 1 三个观测孔的无量纲时间 u 与抽水时间 t 的关系曲线
Fig. 1 The relation curves between the dimensionless times u of the three observation wells and pumping time t

表 4 不同计算方法下的含水层参数

Tab. 4 The aquifer parameters of different calculation methods

方法	含水层参数							S	θ
	$T_X / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$T_Y / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{xx} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{yy} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{xy} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$T_e / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$			
正问题	0.240 0	0.060 0	0.150 0	0.150 0	-0.090 0	0.120 0	$1.000\ 0 \times 10^{-4}$		-45.00
文中方法	直线 1	0.245 5	0.058 7	0.152 6	0.151 6	-0.093 4	0.120 0	$0.933\ 0 \times 10^{-5}$	-44.85
	直线 2	0.232 8	0.062 0	0.145 0	0.149 7	-0.085 4	0.120 1	$0.996\ 8 \times 10^{-5}$	-45.79
直线图解		0.249 7	0.057 9	0.152 2	0.155 4	-0.095 9	0.120 3	$0.958\ 9 \times 10^{-5}$	-45.47

2.2.2 灵敏度分析

根据文献[11]的研究结果可知,泰斯公式在反演含水层参数的过程中对降深数据误差具有一定的传递作用。为探明文中方法对降深数据的灵敏度,对原始降深数据做了 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 的系统扰动以及 0.1% 的随机扰动,计算出了相应的含水层参数相对于扰动前的相对误差,结果见表 5。由表中可知,原始数据的系统误差引起的含水层参数误差基本上与降深数据误差的比例为 1 的正比关系,也就是说文中方法对试验数据的系统误差反应不灵敏,计算过程属于“良态”的。另一方面,从表 5

表 3 线性回归参数表

Tab. 3 The table of the linear regression parameters

方法	孔号	直线参数		
		A_i	\bar{A}	B_i
文中方法	直线 1	OW1	0.499 92	0.098 26
		OW2	0.500 04	0.499 97
		OW3	0.499 94	0.064 21
文中方法	直线 2	OW1	0.500 25	0.103 59
		OW2	0.498 37	0.499 60
		OW3	0.500 19	0.066 36
直线图解		OW1	1.149 46	0.366 63
		OW2	1.147 73	1.149 19
		OW3	1.150 38	0.239 32

2.2 讨论

2.2.1 适用性讨论

将完整的抽水试验数据按直线 1 方法解得的含水层参数 S 、 T_e 、 T_{xx} 、 T_{yy} 和 T_{xy} (分别为 $0.413\ 1 \times 10^{-5}$ 、0.120 1、0.271 4、0.333 4、-0.275 8)代入公式(4)可以计算出每个观测孔在任意观测时刻 t_j 时的无量纲时间 u 值(见图 1)。由图 1 可以看到,当采用文中的方法时,3 个观测孔满足 $u < 0.2$ 的所有降深数据都可以用于含水层参数的计算,而且得到的结果有很高的精度。而采用 Cooper-Jacob 直线图解法进行含水层参数计算时为满足计算精度,通常要求 $u < 0.05$,甚至 $u < 0.01$ 。文中作为对比求解时采用的直线图解法所使用的都是无量纲时间 $u < 0.01$ (相应抽水时长 $t \geq 40 \text{ min}$)时的降深数据,由表 4 可知其计算结果的精度与文中方法相当。由此,可以看出,与 Cooper-Jacob 直线图解法相比,文中方法具有更宽的适用范围,能够更加充分地利用抽水试验数据。

中也可以看出文中方法对抽水数据的随机误差较为敏感,其原因可能是在计算条件下,计算过程属于“病态”的。因此,在应用文中方法时,需要判断计算过程是否为良态,具体判断方法可以参考文献[12],如果为“病态”,就需要和其他参数计算方法的计算结果进行比较和验证,或者计算降深与观测降深进行比较验证。

3 结 语

文章利用由设定的含水层参数计算出的三个观测孔的抽

表 5 灵敏性分析表

%

Tab. 5 The sensitivity analysis table

扰动	T_e	T_X	T_Y	T_{xx}	T_{yy}	T_{xy}	S	θ
1	1.09	0.80	1.37	1.14	0.71	0.61	1.46	0.23
-1	0.91	1.20	0.63	0.85	1.30	1.40	0.53	0.23
5	4.85	4.58	5.12	4.91	4.49	4.40	5.21	0.23
-5	5.16	5.46	4.86	5.10	5.56	5.67	4.76	0.23
0.1(随机)	0.22	20.14	24.67	10.39	11.04	36.42	25.11	0.15

水试验时间降深数据,采用文中的方法反推含水层参数,并与设定的含水层参数、直线图解法求得的含水层进行对比,结果表明文中方法得出的结果是可靠、精确的,而且相对于直线图解法它还有一个非常明显的优点——具有更宽的适用条件;另一方面对其进行灵敏性分析发现文中方法对抽水试验数据的系统误差不敏感,参数计算结果与原始数据的系统误差大致上呈比例为 1 的正比关系,但是,就文中数据的计算结果来看,该方法对抽水数据的随机误差较为敏感,可能是在此条件下的计算过程是“病态”的。

找出文中方法对数据误差的放大作用是本算例下的特性还是此方法的共性,并分析出该方法地误差扩大机制,以降低文中方法对随机误差的灵敏度,更大程度上地提高文中改进直线解析法对求解各向异性含水层中的水文地质参数的实用性,是下一步工作亟需解决的问题。 □

参考文献:

- [1] Hantush M S. Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers[J]. Geophys. Res, 1966,71:421—426.
- [2] Papadopoulos, IS. Nonsteady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. Intern. Assoc[J]. Sci. Hydrol., Proc., 1965:21—31.

- [3] Way S C, McKee R. In-situ determination of three-dimensional aquifer permeabilities[J]. Ground Water, 1982,20:594—603.
- [4] 周志芳,朱学愚,李 艳. 岩体渗透系数张量的半解析计算[J]. 水利学报,1997,(9):6—18.
- [5] 周志芳. 任意各向异性岩体渗透系数张量的半解析计算[J]. 水利学报,1999,(3):65—70.
- [6] 陈崇希,林 敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999:70—122.
- [7] 郭建青,周宏飞,李 彦,等. 分析非稳定流抽水试验数据的改进直线解析法[J]. 中国农村水利水电,2009,(4):18—21.
- [8] Vedat Batu, PHD, PE. Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis[M]. A Wiley-Interscience Publication, 1998:206—223.
- [9] R Srivastava. Implications of using approximation expressions for well function [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995,121(6):459—462.
- [10] 刘 燕,辛璐君,郭建青,等. 抽水试验确定各向异性含水层参数的实例讨论[J]. 勘察科学技术,2012,(6):5—9.
- [11] 郭建青. 泰斯公式对数据误差传递作用的初步分析[J]. 工程勘察,1988,(1):44—47.
- [12] 郭建青,李云峰,王洪胜. 泰斯公式性态分析与误差估计方法[J]. 煤田地质与勘察,1999,27(4):38—42.

(上接第 55 页) 实现了水量供需平衡。

(2)随着洛阳市社会经济的发展和人口的不断增加,除吉利区和偃师市外,其他各区县城镇化率均有不同程度的增加,新安县和伊川县增幅较大,增加生活用水对其的分配。洛阳市除市区、伊川县和洛宁县外,其他耕地面积也均有增加,但由于节水灌溉技术的发展,农业用水量增幅不大。

(3)2015 年洛阳市的供水量能满足需求要求,并有盈余,主要由于三产结构明显优化。但由于农田灌溉面积没有缩减,社会经济发展向生态环境保护倾斜,洛阳市的水资源供需矛盾依然突出。 □

参考文献:

- [1] 周振民. 城市水力学[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [2] 吴 丹,吴凤平. 面向行业的初始水权配置系统优化[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(1):39—44.

- [3] 汪恕诚. 水权和水市场——实现水资源优化配置的经济手段[J]. 中国水利,2000,(11):6—9.
- [4] 梁慧稳. 流域水务一体化管理下水权配置与定价[J]. 东北水利水电, 2002, 20(214).
- [5] 林洪孝,彭绪民. 跨城市水权分配机会的多目标规划模型[J]. 水利学报, 2005,36(4):452—460.
- [6] 牛文娟. 基于 CAS 理论的南水北调东线水资源优化配置模型[J]. 河海大学学报,2007.
- [7] 邓彩琼. 跨区域水资源优化配置模型及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [8] 李长杰,王先甲,郑旭荣. 跨流域初始水权分配方法与模型[J]. 武汉大学学报,2006.
- [9] 周振民. 中国城市水务市场化与监管机制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.