

基于抽水试验的水文地质参数三维进化反演

黄 勇,周志芳,王锦国

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:提出求解水文地质参数的遗传反演算法,并将该方法应用于玄武湖隧道工程抽水试验中.结果表明,用遗传算法反演水文地质参数是可行的.这种方法的优点在于只须给出参数的取值范围,就可自动地搜索出最优参数值.

关键词:抽水试验;水文地质参数;遗传算法;反演;玄武湖隧道

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2002)06-0026-04

水文地质参数(渗透系数、贮水系数、越流因素等)是进行地下水资源评价以及计算与水工建筑有关的地下水问题的一个很重要的参数,它的正确选取对模拟地下水渗流场很关键.另外,在基坑降水、采矿作业和隧道开挖过程中,一般都要将地下水位降到施工面以下,此时,可做抽水试验确定水文地质参数,然后利用确定的参数计算抽水量和降深,以保证施工的正常进行.由此可见,无论是在地下水渗流场模拟、地下水资源评价,还是在基坑降水等方面,水文地质参数都起着重要的作用.

水文地质参数是根据控制方程给出的结构和目标函数 E 在区域和边界上的部分信息或完整信息来确定方程的一个或多个或全部系数.控制方程中的这些系数常常表征介质的某种性质,因此,求解参数控制反问题的目标通常是推求介质的特性参数,从而进一步推求介质的种类^[1].目前,求解水文地质参数的方法主要有(a)试验法,它又可分为室内试验和野外试验.室内试验确定的参数不可避免的会产生尺度效应,野外试验比较接近于实际,但须耗费大量的人力、物力和财力.(b)解析法,主要采用稳定流的 Dupuit 公式和非稳定流的 Thies 公式计算,其中由 Thies 公式派生出来的方法有:配线法、Jacob 直线图解法、水位恢复试验法和拐点法^[2].(c)数值法,它主要由离散和优化法两个部分组成,其中的离散有有限差分、有限元和有限分析等;优化法常采用单纯形法、最速下降法、共轭梯度法和变尺度法等.周志芳等曾用单纯形—有限分析法反求了拉西瓦水电工程裂隙岩体渗透张量^[3],本文则采用实数编码的遗传算法来反演玄武湖隧道工程的水文地质参数.

1 地质概况

1.1 工程简介

南京市计划建设的玄武湖隧道工程已开工.玄武湖隧道呈东西向,线路总长约为 2.7 km,其中湖底隧道长约 1 700 m.现已进行到抽水试验阶段,其目的是确定地层的渗透系数并检验帷幕的止水效果,为后续工程隧道开挖时基坑降水作准备.

1.2 场地地层分布及水文地质条件

研究区地层自上而下分布如下:(a)淤泥层:呈灰黑色,流塑状,含大量有机质,厚度一般为 0.3~0.5 m;(b)粘土-粉质粘土层:灰黄-灰色,软-可塑,局部流塑,呈不连续透镜体状分布;(c)粉土夹粉砂层:灰黄色-灰色,饱和,稍密-松散,夹不等厚饱和、松散粉砂及少量薄层状粉质粘土,埋深 2.6~3.7 m,层厚 4.6~8.6 m;(d)淤泥质粉质粘土夹粉砂层:灰色,流塑,局部夹薄层状粉砂,埋深 7.2~12.6 m,层厚 6.4~10.8 m;(e)粉细砂层:灰色,中密,局部稍密,埋深 16.1~21.1 m,层厚 4.6~14.1 m;(f)粉质粘土-淤泥质粉质粘土层:灰色,流塑,夹薄层状粉砂,埋深 20.2~24.4 m,层厚 2.0~4.3 m;(g)粉砂层:稍密-中密,埋深 30.7~33.8 m,未揭穿;(h)粉质粘土层:灰色,软塑,埋深 33.2~33.4 m.

据初勘揭示的岩土层组合 场内地下水可分为浅层潜水和深层弱承压水,笔者主要考虑浅层孔隙潜水,其含水层为:上部的粉土夹粉砂层赋存孔隙潜水,直接接受大气降水及湖水的补给,故其地下水水位明显受大气降水及湖水影响;下部的淤泥质粉质粘土夹粉砂层,具有含水层厚度大,水量丰富,透水性好及水源补给充足特点.玄武湖湖水位 10.2 m,高出开挖地面约 2 m.

2 遗传算法反演水文地质参数的实现

2.1 评价模型

反演水文地质参数所使用的评价模型由两个部分组成,水流模拟模型和水位、流量优化模型.水流模拟模型:假设水的密度为常数,则三维各向同性地下水稳定流的运动方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial h}{\partial z}\right) - w = 0 \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数(L/T); h ——水头(L); w ——源汇项.

水位、流量优化模型:经典的最小二乘法所建立的目标函数并没有考虑流量条件,只是将水头残差平方和最小作为目标函数,即 $\min E = \|H_c - H_0\|^2$,由于反问题的不惟一性,按式(1)所得到得反演结果是不惟一的^[1].因此,既考虑水头残差平方和最小,又考虑了流量残差平方和最小,则可以建立如下的目标函数

$$E(K_j^i) = \sum_{k=1}^M \omega_k \sqrt{(H_k^c - H_k^0)^2} + \sum_{l=1}^N \omega_l \sqrt{(Q_l^i - Q_l^0)^2} \quad (2)$$

式中: K_j^i ——待求的参数,上标 i 表示根据岩体透水性划分的第 i 个子区, $i = I, II, \dots, NNO$, NNO 为分区的总数,下标 j 表示第 i 个子区中第 j 个参数, $j = 1, 2, \dots, NK$, NK 为某区参数的总数; ω_k, ω_l ——第 k 个水头观测点和第 l 个抽水井的权函数,根据观测井离主井的位置而定,且有

$$\sum_{k=1}^M \omega_k = 1.0 \quad \sum_{l=1}^N \omega_l = 1.0 \quad (3)$$

式中: M, N ——区域内观测点(孔)和抽水井的总数; H_k^c, H_k^0 ——区域内第 k 个观测点水头计算值和观测值; Q_l^c, Q_l^0 ——区域内第 l 个抽水井流量计算值和实际值.显然,由上述约束条件,能够找到一组待求参数使得目标函数 E 趋于 0.

2.2 遗传算法简介^[4]

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种适应全局优化概率搜索算法.它最早由美国密执安大学的 Holland 教授提出,起源于 20 世纪 60 年代对自然和人工自适应系统的研究.遗传算法是一类可用于复杂系统优化计算的鲁棒搜索算法,本文采用实数编码的遗传算法.它是利用概率论的随机摄动直接实现目标函数的优化而不需要求导,其算法核心包括 3 种基本操作:选择、交叉和变异.具体步骤如下(见图 1).

a. 产生初始群体.由于实数编码方法不需要对决策变量实行编码处理,可直接根据问题所要求的精度,利用随机函数产生一定数量的个体,构成初始“群体”.若以 $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 为目标函数,则向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 为一个个体.

b. 评价目标函数.模型评价标准是遗传算法的一个重要方面.通常的评价标准是指目标函数与传统寻优方法的“适应度”,因群体中每个个体代表一种决策,所以,将决策变量代入水流模拟模型,可得到对应的目标函数值.

c. 选择.这是遗传算法的关键,本文采用最优保存策略算法,经数学严格证明^[5],最优保存策略是全局收敛的.找出当前群体中适应度最高的个体和适应度最低的个体,若当前群体中最佳个体的适应度比总的迄今为止的最好个体的适应度还要好,则以当前群体中的最佳个体作为新的迄今为止的最好个体,

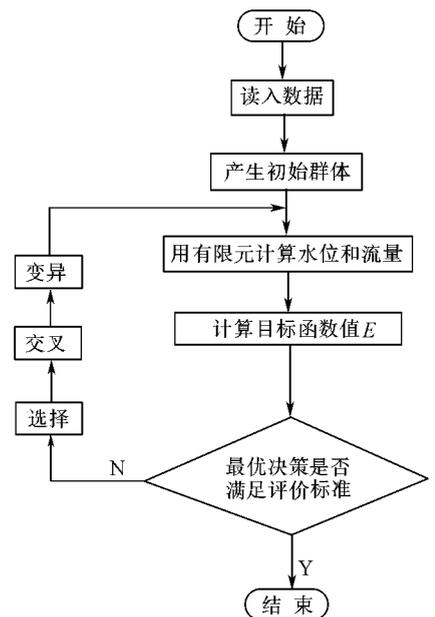


图 1 遗传算法反演参数流程

Fig.1 Flow chart of inverse analysis of parameters based on genetic algorithm

并用以替换掉当前群体中的最佳个体。

d. 交叉. 交叉过程通过交叉概率 P_c 来实现, 一般 $P_c = 0.4 \sim 0.99$. 将以上过渡群体中获胜的个体两两交叉, 随机产生一个小数 $P_r \in [0, 1]$, 如果 $P_c < P_r$, 则进行交叉操作, 如果 $P_c \geq P_r$, 则不发生交换, 这一过程重复进行 $M/2$ 次, 以保证群体的规模不变。

e. 动态变异. 它是为提高精度, 增加细调能力而设计的. 变异过程通过概率 P_m 来操作, $P_m = 0.01 \sim 0.1$. 若父亲 X 中元素 x_k 被选出来作变异, 则后代为 $X' = [x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n]$. 其中 x_k 有两种可能, $x'_k = x_k + \Delta(t, x_k^u - x_k)$ 或 $x'_k = x_k - \Delta(t, x_k - x_k^l)$. x_k^u, x_k^l 分别对应变量 x_k 的上下界. 函数 $\Delta(t, y)$ 返回 $[0, y]$ 中的一个值, 使得 $\Delta(t, y)$ 随 t 增加而趋于 0 (t 是代数), 函数的这个性质使得初始迭代时, 搜索均匀分布在整个空间, 而到后期则分布在局部范围内. $\Delta(t, y) = yr(1 - t/T)^b$, 其中 r 是 $[0, 1]$ 间的随机数, T 是最大代数, b 是确定不均匀度的参数。

3 计算成果分析

研究区钻孔(井)平面布置见图 2. 抽水试验采用的是定流量单井(C1)抽水, 根据流量不同进行了 3 个落程的抽水试验, 其流量大小分别为 $1.04 \text{ m}^3/\text{h}$, $3.28 \text{ m}^3/\text{h}$, $5.68 \text{ m}^3/\text{h}$.

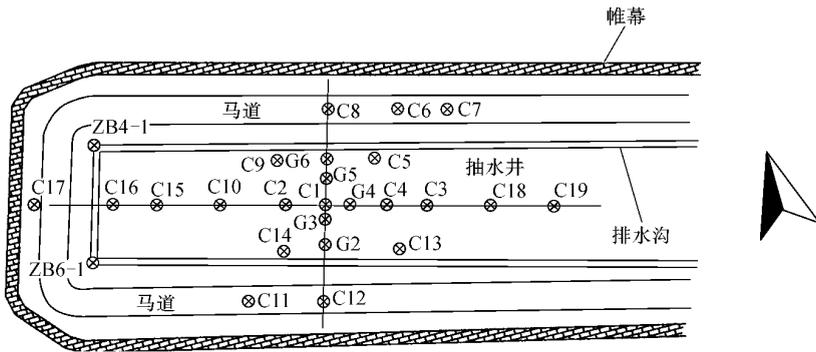


图 2 研究区钻孔平面布置示意图

Fig.2 Plan arrangement of bore holes in research areas

对图 2 所示研究区域进行三维离散, 并分为三个区, 即上部潜水含水层、下部越流含水层和帷幕区. 共剖分出 2304 个节点, 1750 个单元, 其剖分见图 3. 其中顶面为潜水自由面边界, 侧向为定水头边界(玄武湖水位), 垂向地层与 (b)~(f) 层位基本一致。

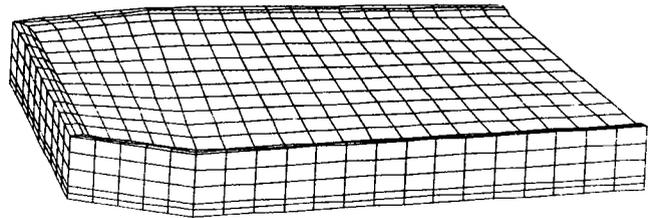


图 3 研究区剖分示意图

Fig.3 Meshes for research areas

抽水试验过程中, 以 C1 为抽水井, 其余井为观测井. 在进行水文地质参数反演时, 是在水位基本稳定(4 h 内水位相差不超过 2 cm)后实施的, 选取

第三个落程的试验数据作为实测值进行反演, 其中将 C_1, C_2, C_4, G_2, G_5 的实测水位和玄武湖水位作为已知水位, 用有限元计算出其它点的水位. 在其余 20 多口观测井中, 选取有代表性的 C_{10}, C_{12}, G_6, C_3 井的水位作为观测水位. 与计算值进行比较, 当满足误差条件时, 可得到最优的参数值, 即含水层、帷幕和弱透水层渗透系数分别为 $1.119 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.0053 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.112 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. 表 1 是观测井的计算水位和实际水位, 同时还计算了抽水井的流量, 其计算值和实测值分别为 $136.43 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $136.32 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. 可见, 不论是水位, 还是流量其误差都比较小, 在两者的约束下, 得出的参数值既是惟一的, 也是最优的. 若观测孔水位越多, 则反演的参数越准确, 而传统的水位约束得到的参数值不是惟一的. 帷幕的渗透系数很小, 这主要是因为施工时用了三排帷幕, 防渗性非常好; 另外, 通过帷幕外观测井(G_{10} 和 G_{14})的观测水位也可看出, 在每个落程抽水过程中, 其水位变化幅度不超过 2 cm. 因此, 反演的结果是合理的. 为了检验由第三落程反演的渗透参数的可靠性, 笔者将反演的渗透系数代入式(1), 并利用有限元计算了第一、二落程的水位, 其计算水位与观测水位列于表 2.

表1 第三落程水位计算值与实测值对比

Table 1 Comparison of calculated and observed groundwater tables in the third drop

井号	水位/m	
	观测值	计算值
C10	7.22	7.31
C12	7.52	7.26
G6	7.18	6.86
C3	7.20	7.20

表2 水位计算值与实测值对比

Table 2 Comparison of calculated and observed groundwater tables

井号	第一落程水位/m		第二落程水位/m	
	观测值	计算值	观测值	计算值
C10	7.57	7.76	7.48	7.57
C12	7.74	7.85	7.66	7.58
G6	7.56	7.52	7.38	7.20
C3	7.44	7.40	7.29	7.12

在第一落程中,抽水井流量的计算值和实测值分别为 $24.96 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $23.24 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,在第二落程中,抽水井流量的计算值和实测值分别为 $78.72 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $77.59 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。利用反演的参数值计算的水位、流量与观测水位、实际流量差别不大,表明用遗传算法反演水文地质参数是可靠的,能够应用于实际。

4 结 论

a. 采用了遗传算法反演水文地质参数,并将该方法应用于玄武湖隧道工程抽水试验中,实践表明,这种方法反演的参数是可靠的,能够应用于实际。

b. 遗传算法具有许多优点,与解析法、实验法等相比,遗传算法不仅能够反演地层渗透系数、越流因素,而且还能反演帷幕渗透系数,反演的参数值的精度也较高;与单纯形法相比,遗传算法能够收敛于全局最优解,而单纯形法只收敛于局部最优,最速下降法、共轭梯度法和变尺度法,都要利用目标函数的导数值等其它一些辅助信息才能确定搜索方向,对于地下水流方程,目标函数无法用参数的显式表示,求导几乎是不可能的,而遗传算法仅使用由目标函数值变换来的适应度的函数值,就可以确定进一步的搜索方向和搜索范围,无需目标函数的导数值等其它一些辅助信息,因此,该方法值得推广。

c. 用遗传算法可避免手工调参带来的随机性,也可减少确定参数的时间。

d. 本文所使用的水流模拟模型是较简单的三维稳定流运动方程,而事实上抽水过程是随时间而变化的,即所谓的稳定也是相对的,因此,用遗传算法反演参数时,水流模拟最好选用潜水三维非稳定流运动方程,这样计算的结果也许会更接近于实际。

参考文献:

- [1] 金忠青,周志芳.工程水力学反问题[M].南京:河海大学出版社,1997.59~75.
- [2] 薛禹群,朱学愚,吴吉春,等.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.98~102.
- [3] 周志芳,钱孝星.有限分析法在反求裂隙岩体渗透张量中的应用[J].水利学报,1993(5):68~75.
- [4] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2000.28~88.
- [5] 韩玉兵.遗传算法数学机理分析[J].河海大学学报(自然科学版),2001(3):92~94.

Pumping test based 3-D evolution inverse analysis for identification of hydrogeological parameters

HUANG Yong, ZHOU Zhi-fang, WANG Jin-guo

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: A method for inverse analysis of hydrogeological parameters based on the genetic algorithm is developed and applied to the pumping test for the Xuanwuhu Tunnel Project. The results show that the method is feasible for inverse analysis of hydrogeological parameters. The merit of the method lies in that only with a range of a parameter, the optimum value of the parameter can be automatically searched out.

Key words: pumping test; hydrogeological parameter; genetic algorithm; inverse analysis; Xuanwuhu Tunnel