

# 非线性组合模型在库岸边坡地下水位预测中的应用

邓宏艳<sup>1,2a,2b</sup>, 王成华<sup>2a,2b</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;

2. 中国科学院 a. 水利部成都山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

b. 水利部成都山城灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:**根据某库岸边坡地下水位的监测资料,建立了地下水位预测的时间序列法和速率分析法,在此基础上构建了非线性组合预测模型。各模型的预测结果分析表明:非线性组合模型的精度高于单一预测模型,是一种较好的库岸边坡地下水位预测方法,非线性组合预测模型的应用,为库岸边坡稳定性的长期预测提供创造了条件。

**关键词:**非线性组合模型;时间序列法;速率分析法;库岸边坡;边坡稳定性;地下水位预测;地下水  
中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)01-0031-05

## Prediction of Groundwater Level for Reservoir Slope with Nonlinear-Combined Model

DENG Hong-yan<sup>1,2a,b</sup>, WANG Cheng-hua<sup>2a,b</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2a. The Key Lab of Mountain Hazards and Earth's Surface Process, CAS, Chengdu 610041, P. R. China; b. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** With the monitoring data of groundwater level of some reservoir slope, the nonlinear-combined model was established on the basis of establishing the time series method and speed analysis method. Upon the comparison, it was found that the precision of non-linear combined-model was higher than that of single model. It was an effective prediction method for groundwater level of reservoir slope and could be employed for stability prediction of reservoir slope.

**Key words:** nonlinear-combined model; time series method; speed analysis method; reservoir slope; slope stability; groundwater level prediction; groundwater

水库蓄水后,库岸边坡的稳定问题一直备受关注。库岸坡体内地下水位的变化对坡体的稳定性影响非常大,地下水是库岸滑坡形成、发生和发展的重要关键的因素。岸坡内地下水位的变化受多种因素的影响,库水位变化和降雨量就是其中的控制因素<sup>[1-3]</sup>。库岸坡体内地下水位的长期预测是进行库岸边坡稳定性长期预测的前提,同时也是确保水库安全运营的关键。关于地下水位的预测问题,目前有许多方法,如时间序列法、灰色预测法、神经网络

法、模糊模式识别法等,但各种方法都各有优缺点<sup>[4]</sup>。如神经网络法就存在易陷入局部极值和初始权值的选取问题等<sup>[5]</sup>。因此单一的预测模型很难充分利用各种信息,而非线性组合预测模型能够充分利用各单项预测方法所提供的信息,有效的提高预测精度<sup>[6]</sup>。

为此,该文以建立地下水位监测的某水库岸坡为例,由于该水库岸坡地处干旱气候区域,年蒸发量远远大于年降雨量,基本不受地表降水影响,地下水

收稿日期:2009-05-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAC10B04);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-302)

作者简介:邓宏艳(1977-),女,博士生,主要从事滑坡灾害及防治研究,(E-mail)annedeng@163.com.

位主要随库水位的变化而变化。而库水位的变化又具有明显的时间周期性,所以该文在已有监测资料的基础上,先建立了时间序列法和速率分析法两个单一模型,然后在此基础上建立了非线性组合预测模型<sup>[7]</sup>。结果分析表明,非线性组合预测模型的精度高于单一模型,非线性组合预测模型是一种很好的库岸边坡地下水长期预测方法。

## 1 非线性组合预测模型

非线性组合预测模型就是将单一模型或组合模型的预测结果,进行非线性组合,从而提高预测的精度和稳定性。该文选用的是加权调和平均组合预测模型<sup>[8-10]</sup>。

设某一预测问题的某个原始指标序列为  $\{y_t, t=1, 2, \dots, N\}$ , 存在  $n$  种单项预测方法对其进行预测, 设第  $i$  种单项预测方法在第  $t$  时刻的预测值为  $f_{it}, i=1, 2, 3, \dots, n, t=1, 2, \dots, N$ 。根据加权调和平均数计算公式, 令:

$$f_t = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{f_{it}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{f_{it}}} \quad (1)$$

其中:  $f_t$  为  $t$  时刻的加权调和平均组合预测值;  $k_i$  为第  $i$  种方法的组合加权系数, 且满足约束条件  $\sum_{i=1}^n k_i = 1, k_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。为了计算加权调和平均组合预测的权系数, 可将(1)式变化为:

$$\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{f_{it}} = \frac{1}{f_t} (t = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

第  $i$  种预测方法在第  $t$  时刻的预测误差为  $e_{it} = \frac{1}{y_t} - \frac{1}{f_{it}}$ , 组合预测模型在第  $t$  时刻的预测误差为  $e_t = \frac{1}{y_t} - \frac{1}{f_t}, i = 1, 2, 3, \dots, n, t = 1, 2, \dots, N$ 。则以预测误差平方和为准则的非负加权系数的组合预测模型为下列最优化问题:

$$\begin{cases} \min J = \sum_{t=1}^N e_t^2 \\ e_t = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{f_{it}} = \frac{1}{y_t} \quad (t = 1, 2, \dots, N) \\ \sum_{i=1}^n k_i = 1, \quad k_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

令  $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T, E = (E_{ij})_{n \times n}, K$  为组合预测模型的权向量,  $E$  为组合预测倒数误差协方差矩阵,  $E_{ij} = \sum_{t=1}^N e_{it} e_{jt}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n, t = 1, 2,$

$\dots, N$  设  $R = (1, 1, \dots, 1)^T$ , 则:

$\min J = \sum_{t=1}^N e_t^2 = K^T E K$ , 则引入拉格朗日乘子法求解出组合预测模型的权向量为:

$$K = \frac{E^{-1} R}{R^T E^{-1} R} \quad (4)$$

## 2 时间序列法预测模型及速率分析法模型

### 2.1 时间序列法<sup>[11-15]</sup>

时间序列法将预测对象按照时间顺序排列, 以揭示预测对象过去随时间的变化规律, 从而推断今后的变化趋势及发展规律。该文主要研究水库在蓄水初期, 库水位变化上升时期的库岸边坡地下水水位的变化情况, 库岸边坡的地下水水位变化具有明显的趋势性(包括升降趋势和周期趋势), 因此属于非平稳的时间序列。对于非平稳的时间序列必须将其转化为平稳的时间序列才能用  $AR(n)$  模型进行预测<sup>[16-17]</sup>, 目前主要有 2 种处理方法: 提取趋势项和消除趋势项。该文采用差分法消除趋势项, 进而得到平稳随机项, 再对平稳随机项的预测结果进行逆推, 得出相应的预测值。

设库岸滑坡地下水位的原始指标序列为  $\{z_t\}$ , 将  $\{z_t\}$  进行差分后得到平稳随机序列  $\{x_t\}$ <sup>[18-20]</sup>, 则:

$$\nabla z_t = z_t - z_{t-1} \quad (5)$$

$$\nabla^2 z_t = \nabla(\nabla z_t) = z_t - 2z_{t-1} + z_{t-2} \quad (6)$$

$$\nabla^d z_t = \sum_{j=1}^d (-1)^j C_d^j z_{t-j} \quad (7)$$

式(5), (6), (7)分别是非平稳时间序列  $\{z_t\}$  的一阶, 二阶和  $d$  阶差分,  $d \geq 1$ , 且为正整数,  $C_d^j = \frac{d!}{j!(d-j)!}$ 。对  $\{z_t\}$  进行  $d$  阶差分后就可以得到平稳序列  $\{x_t\}$ 。

采用游程法检验  $\{x_t\}$  的平稳性, 如果满足平稳性则进行回归分析; 如果不满足则对  $\{x_t\}$  再进行差分, 直至满足。

对于平稳随机成分  $\{x_t\}$  的确定, 对于此序列, 建立一元自回归  $AR(n)$  模型, 具体公式如下:

$$x_t = \sum_{i=1}^n \beta_i x_{t-i} = \beta_1 x_{t-1} + \beta_2 x_{t-2} + \beta_3 x_{t-3} + \dots + \beta_n x_{t-n} \quad (8)$$

式中:  $n$  为自回归模型的阶数,  $\beta_i (i=1, 2, \dots, n)$  为模型的待定系数。

对于回归方程可先用 AIC 准则判断阶数, 再用 MATLAB 编程求解。

### 2.2 速率分析法<sup>[11]</sup>

地下水位的速率分析法,是在同一自然地质环境条件下的库区,并经历了一定时间的运行之后,利用地下水位随库水位变化的速率进行分析,估算未来一定时间地下水位可能的位置和变化过程。地下水位的变化速率,不能简单地看成一个数值,它有丰富地内涵。地下水位变化速率的大小不仅反映了库水位变化的大小和特征,而且还反映了岩、土体组成,结构和渗透性能。

库岸边坡地下水水位随时间的变化速率公式如下:

$$V_t = \frac{\Delta h_w}{\Delta t} \quad (9)$$

式中:  $V_t$  为单位时间内地下水位变化的平均速率,正值为地下水位上升平均年速率,负值为地下水位下降平均速率;  $\Delta t$  为地下水位变化所经历的时间,月;  $\Delta h_w$  为在  $\Delta t$  时间内地下水位的变化幅度, m。

由上述公式可以写出未来某一时间库岸滑坡地下水位的预测公式为:

$$h_w = h_{w_0} + (1 + \eta)V_t T \quad (10)$$

式中:  $h_w$  为被预测时间的地下水位, m;  $h_{w_0}$  为起始水位, m;  $T$  为预测起始时刻到结束时刻所经历的时间, 月;  $\eta$  为水文地质修正系数。

对于水文地质修正系数  $\eta$  的取值,主要是由于地下水位观测期间库岸再造的影响,库岸再造作用使得观测钻孔距离库水岸边的距离发生了变化。

### 3 实例分析

根据某大型水库的近坝库岸边坡一个典型钻孔地下水位 33 个月(1986. 10—1989. 6)的监测资料(表 1),运用上述预测方法,分别建立时间序列预测模型和速率分析预测模型,具体模型如下:

表 1 钻孔 2 地下水水位监测数据表

时间	库水位	监测值	时间	库水位	监测值
1986. 10	2 460. 73	2 496. 50	1988. 03	2 530. 11	2 498. 53
1986. 11	2 500. 41	2 496. 70	1988. 04	2 528. 12	2 498. 65
1986. 12	2 507. 19	2 496. 56	1988. 05	2 527. 80	2 498. 75
1987. 01	2 511. 22	2 496. 46	1988. 06	2 527. 83	2 499. 00
1987. 02	2 514. 41	2 497. 00	1988. 07	2 533. 6	2 499. 13
1987. 03	2 509. 43	2 496. 87	1988. 08	2 533. 75	2 499. 23
1987. 04	2 504. 45	2 496. 74	1988. 09	2 534. 00	2 499. 35
1987. 05	2 503. 50	2 496. 62	1988. 10	2 543. 00	2 499. 50

续表 1

时间	库水位	监测值	时间	库水位	监测值
1987. 06	2 502. 45	2 496. 49	1988. 11	2 546. 00	2 499. 90
1987. 07	2 487. 11	2 496. 76	1988. 12	2 547. 60	2 500. 11
1987. 08	2 529. 60	2 496. 92	1989. 01	2 541. 85	2 500. 82
1987. 09	2 532. 05	2 497. 36	1989. 02	2 536. 63	2 500. 97
1987. 10	2 537. 36	2 497. 61	1989. 03	2 533. 06	2 501. 16
1987. 11	2 540. 54	2 497. 95	1989. 04	2 531. 31	2 501. 18
1987. 12	2 539. 72	2 498. 38	1989. 05	2 532. 66	2 501. 22
1988. 01	2 535. 70	2 498. 35	1989. 06	2 552. 14	2 501. 60
1988. 02	2 534. 80	2 498. 43			

先对原监测资料进行一阶差分,然后对差分结果采用游程法检验,检验表明一阶差分后得到的随机序列  $\{x_t\}$ ,满足平稳性要求,再运用 AIC 准则定阶,用 MATLAB 求解得出公式为:

钻孔 2 的平稳随机时间序列方程为:

$$x_t = -0.2308x_{t-1} - 0.2634x_{t-2} - 0.1719x_{t-3} + 1$$

地下水位的预测值公式为:

$$z_t = x_t + z_{t-1}$$

钻孔 2 的速率法公式为:

$$h_w = h_{w_0} + (1 + 0.34) \times 0.2544 \times T$$

为了进一步提高预测精度,在以上两种预测模型的基础上进行加权调和平均组合的非线性预测,利用上述公式拟合出组合预测倒数误差协方差矩阵  $E$ :

$$E = \begin{bmatrix} 2.019 \times 10^{-13} & -1.4115 \times 10^{-8} \\ -1.4115 \times 10^{-8} & 4.673 \times 10^{-14} \end{bmatrix}$$

得出权向量为:

$$K = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

则加权调和平均组合预测模型为一等权向量模型,公式为:

$$f_t = \frac{1}{\frac{0.5}{f_{1t}} + \frac{0.5}{f_{2t}}}$$

利用标准差及相关系数的公式对预测结果进行精度分析<sup>[12]</sup>,

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y - X)^2}, R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - X)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}$$

式中  $y$  为监测值,  $X$  为预测值,  $\bar{y}$  为监测平均值。

则各模型的预测结果及精度比较如下(表 2):

表 2 单一模型与组合模型的预测值及误差比较

时间		1989.07	1989.08	1989.09	1989.10	1989.11	1989.12
	监测值 $y/m$	2 501.8	2 503.28	2 503.96	2 504.65	2 505.36	2 506.42
时间序列法 $X_1$	预测值/m	2 502.5	2 503.19	2 503.73	2 504.27	2 504.85	2 505.48
	误差/m	-0.7	0.09	0.23	0.38	0.51	0.94
钻孔 2 速率法 $X_2$	预测值/m	2 501.94	2 502.62	2 503.65	2 505.01	2 506.71	2 508.76
	误差/m	-0.141	0.657	0.315	-0.358	-1.353	-2.338
非线性组合模型 $X_3$	预测值/m	2 502.22	2 502.91	2 503.69	2 504.64	2 505.78	2 507.12
	误差/m	-0.42	0.374	0.272	0.011	-0.421	-0.698

通过对单个模型及组合模型的结果和精度比较,可以看出组合预测模型的精度较高,能够很好的拟合钻孔 2 的地下水位变化(表 3、图 1)。

表 3 钻孔 2 各预测模型精度比较

模型	时间序列法	速率法	非线性组合预测模型
标准差	0.554	1.153	0.419
相关系数	0.927	0.626	0.959

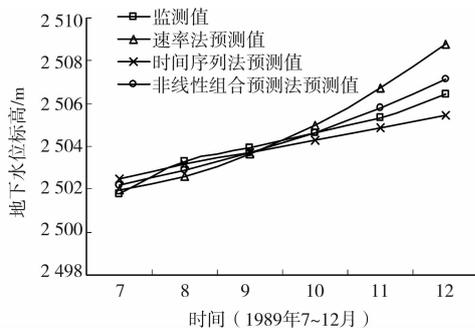


图 1 钻孔 2 地下水位监测值及各模型预测值随时间变曲线图

## 4 结 论

通过对某库岸滑坡地下水位长期预测的研究,可以得出如下结论:

1) 该文中的预测对象就有一定的特殊性,该岸坡体内地下水位的变化基本不受降雨影响,主要受库水位变化控制。库水位的变化又具有明显的时间周期性,因此该文建立了时间序列模型。这个时间序列模型并不是简单的时间因素控制,还隐含了库水位变化的大小和特征,并且反映了岩、土体组成,结构和渗透性能。

从时间序列法、速率分析法和非线性组合预测法的预测结果、误差和精度分析可以看出,非线性组合合法的预测精度较高,时间序列法次之,速率分析法

较差;组合预测的结果与监测值最接近。同时时间序列法作为单一预测模型也能较好的对地下水位进行预测。

2) 在图 1 中,可以看出非线性组合预测模型能够很好的拟合库岸边坡的地下水位变化过程,这为库岸滑坡地下水位的长期预测创造了条件,进而对边坡的稳定性预测研究奠定了基础。

3) 组合预测模型虽然能较好的提高预测精度,但是单一模型是组合模型的基础,如何进一步提高单一模型的预测精度将是今后预测问题的重要发展方向。

## 参考文献:

- [1] 李晓,张年学,廖秋林,等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(21):3714-3720.  
LI XIAO, ZHANG NIAN-XUE, LIAO QIU-LIN, et al. Analysis on hydrodynamic field influence by combination of rainfall and reservoir level fluctuation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(21):3714-3720.
- [2] TH W J VAH ASCH, BUMA J T. Modeling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the terres noires region of barcelonnette [J]. Earth Processes and landforms, 1997, 22: 131-141.
- [3] RITA FERNANDES DE CARVALHO, JOSE SIMAO ANTUNES DO CARMO. Landslides into reservoirs and their impacts on banks [J]. Environ Fluid Mech., 2007,7: 481-493.
- [4] 李希灿,王静,赵庚星. 地下水位动态预测模糊识别全解析模式[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2009,28(4):637-640  
LI XI-CAN, WANG JING, ZHAO GENG-XING. The prediction method of groundwater level based on the

- complete analysis model of fuzzy pattern recognition [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009,28(4):637-640.
- [5] 李喜盼,刘新侠,张安兵. 遗传神经网络在滑坡灾害预报中的应用研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2009,26(1):69-71.  
LI XI-PAN, LIU XIN-XIA, ZHANG AN-BING. Study in landslide prediction on genetic algorithm optimized BP network[J]. Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science edition, 2009,26(1): 69-71.
- [6] 陈华友,盛昭瀚,刘春林. 调和平均数的组合预测方法之性质研究[J]. 系统工程学报,2004,19(6): 620-624.  
CHEN HUA-YOU, SHENG ZHAO-HAN, LIU CHUN-LIN. Research on properties of harmonic means combination forecasting method[J]. Journal of System Engineering, 2004,19(6): 620-624.
- [7] 纪爱兵,庞家宏,李树环. 基于 Choquet 模糊积分的非线性组合预测及应用[J]. 模糊系统与数学,2006,20(3):145-149.  
JI AI-BING, PANG JIA-HONG, LI SHU-HUAN. Combination forecasting based on fuzzy integral and its application[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2006, 20(3):145-149.
- [8] 徐精明,张志宝,马永开. 非线性组合预测方法研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报,1998,12(3):38-41, 49.  
XU JING-MING, ZHANG ZHI-BAO, MA YONG-KAI. Research based on non-linear combined prediction method[J]. Journal of Anhui Agrotechnical Teachers College, 1998,12(3):38-41,49.
- [9] 韩冬梅,牛文清,杨荣. 线性与非线性最优组合预测方法的比较研究[J]. 情报科学,2007,25(1):1672-1678.  
HAN DONG-MEI, NIU WEN-QING, YANG RONG. The comparative study on linear and non-linear optimal forecast-combination methods[J]. Information Science, 2007,25(1):1672-1678.
- [10] 田斌,任德记,何薪基. 非线性组合优化模型在水工建筑物位移监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004,28(4):55-58.  
TIAN BIN, REN DE-JI, HE XIN-JI. Application of nonlinear composite optimized model to displacement monitoring of hydro-structures [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004,28(4):55-58.
- [11] 王成华,高鹏,熊传祥. 龙羊峡水电工程库岸地下水动态规律及其预测[R]. “七·五”科技攻关项目报告, 1994.
- [12] 刘磊磊,高德凯,廖静. 基于时间序列法的管网水质趋势分析模型[J]. 安徽农业科学,2007,35(4):1079-1080,1142.  
LIU LEI-LEI, GAO DE-KAI, LIAO JING. Water quality model based on time series method[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2007,35(4):1079-1080,1142.
- [13] 王清华,周瑜,刘立辉. 基于时间序列分析法的建筑变形监测技术研究[J]. 采矿技术,2008,8(2):32-34.  
WANG QING-HUA, ZHOU YU, LIU LI-HUI. Study on technology of structure deformation monitoring based on time series method[J]. Mining Technology, 2008,8(2):32-34.
- [14] 张贻民,梁明. 数学建模的几种基本预测方法的探讨[J]. 茂名学院学报,2006,16(6):39-42.  
ZHANG YI-MIN, LIANG MING. Discussion on some basic prediction methods about mathematical models [J]. Journal of Maoming College, 2006,16(6):39-42.
- [15] 张善文,雷英杰,冯有前. MATLAB在时间序列分析中的应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007
- [16] NIGEL MEADE. Evidence for the selection of forecasting methods[J]. Journal of Forecasting, 2000, 19: 515-535.
- [17] SHAH C. Model selection in univariate time series forecasting using discriminant analysis[J]. International Journal of Forecasting, 1997,13: 489-500.
- [18] 王炜,杜观金. 应用时间序列分析[M]. 桂林:广西师范大学出版社,1998.
- [19] 杨位钦,顾岚. 时间序列分析与动态建模[M]. 北京:北京工业学院出版社,1986.
- [20] 李秀珍,孔纪名,王成华. 最优加权组合模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 自然灾害学报,2008,17(2):53-57.  
LI XIU-ZHEN, KONG JI-MING, WANG CHENG-HUA. Application of combined -model with optimum weight in prediction of landslide deformation [J]. Journal of Natural Disasters, 2008,17(2):53-57.

(编辑 王秀玲)