

基于 ARIMA-RTA 组合模型的海堤工程沉降预测

秦鹏^{1,2}, 苏怀智¹, 沈跃军³

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江水利水电学院 水利系, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江省钱塘江管理局勘测设计院, 浙江 杭州 310016)

摘要: 海堤工程沉降预测对工程维护和灾害防治具有重要意义,但因影响沉降的因素较多,目前尚无一种普适的分析模型.以海堤工程的沉降数据为研究对象,充分利用 ARIMA 模型较高的拟合能力和 RTA 的等维递补预测思想提高海堤工程监测数据的预测长度,建立了 ARIMA-RTA 组合预测模型,并以浙江某海堤工程为例进行了实例计算,对沉降实测值和模型预测值进行比较.结果表明,ARIMA-RTA 组合模型能够充分挖掘监测数据的动态信息,具有物理机制明确,预测精度高的优点,为海堤工程监测资料分析提供了新的研究思路.

关键词: 海堤工程; 沉降预测; ARIMA; RTA

中图分类号: TU441+.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)05-0066-05

海堤是由沿海地区当地土石材料填筑而成,用来防御台风、抵御海潮的重要水利设施.海堤工程因不均匀沉降引起的堤身破坏对沿海地区人民生命安全和经济发展构成了巨大安全隐患^[1].因此,对海堤工程进行有效的沉降预测,对保障工程质量安全和可能发生不利变形的预警具有重要意义.

在以往研究中,基于土体本构模型的反演方法、系统分析和控制的理论等多种方法及模型都被尝试应用于海堤工程的变形预测中,但由于海堤工程的沉降是由土的含水率、内摩擦系数、黏聚力、施工期工程对地基的扰动、降水、海浪冲刷等诸多因素影响、制约的共同结果,因此目前尚未建立起一种具有普适意义的分析模型^[1-2].

时间序列是研究系统历史行为的客观记录,它包含了系统结构特征及其运行规律,通过提取时间序列的有效信息对数据进行预测,是海堤工程沉降变形预测的可靠思路^[1,3].灰色理论、混沌理论、神经网络等非线性方法被应用到时间序列分析领域,并取得了一些成果,但这些方法都对数据的长度有较强依赖性,海堤工程监测数据量较少的特点以及数据中白噪的干扰都会对这些方法的预测精度造成较大影响^[4-7].因此,本文将回归模型的研究方向引入海堤工程沉降预测领域,建立海堤工程沉降时序的差分自回归移动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average Model,简记 ARIMA),并利用实时跟踪算法(Realtime Tracing Algorithm,简记 RTA)对原有模型进行改进,从而建立差分自回归移动平均模型与实时跟踪算法组合预测模型(ARIMA-RTA 预测模型),以期海堤工程沉降预测提供一种合理、便捷的新计算模型.

1 ARIMA-RTA 组合模型的建模步骤

1.1 ARIMA 模型的建立

ARIMA 模型全称为自回归移动平均模型(简记 ARIMA)^[3],ARIMA(p, d, q)为差分自回归移动平均模型, p 为自回归项; d 为时间序列成为平稳时所做的差分次数; q 为移动平均项数.ARIMA(p, d, q)模型的数学

收稿日期: 2013-03-16

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301061);江苏省杰出青年基金资助项目(BK2012036)

作者简介: 秦鹏(1984-),男,河北沧州人,讲师,博士研究生,主要从事水工程安全监控理论的教学与科研工作.

E-mail: qp021625@163.com 通信作者: 苏怀智(E-mail: su_huaizhi@hhu.edu.cn)

表达式如下:

$$\Phi(B) \nabla^d x_i = \Theta(B) \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: $\nabla^d = (1 - B)^d$; $\Phi(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_p B^p$; $\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$; ε_i 为白噪声序列.

其建模步骤如下:

(1) 对原序列进行平稳性检验, 如果序列不满足平稳性条件, 可以通过差分变换 (单整阶数为 d , 则进行 d 阶差分) 或其他变换, 本文通过自相关函数 (AC) 和偏自相关性 (PAC) 来检验时间序列的平稳性^[3,4]. 计算自相关函数的具体表达式为:

$$R_k = E[(X_i - \mu_i)(X_{i+k} - \mu_{i+k})] / \sigma^2, \quad \rho_k = R_k / R_0 \quad (2)$$

式中: E 为期望值; X_i 为 $t(i)$ 时的随机变量值; μ_i 为 $t(i)$ 时的预期值; σ^2 为方差; ρ_k 为自相关函数.

(2) 根据时间序列模型的识别规则, 建立相应的模型. 若平稳序列的偏相关函数是截尾的, 而自相关函数是拖尾的, 可断定序列适合 AR 模型; 若平稳序列的偏相关函数是拖尾的, 而自相关函数是截尾的, 则可断定序列适合 MA 模型; 若平稳序列的偏相关函数和自相关函数均是拖尾的, 则序列适合 ARIMA 模型^[8].

(3) 利用最小艾卡信息量准则 (AIC) 来确定 ARIMA 模型的阶数 p 和 q , 并在初始估计中选择尽可能少的参数.

AIC 是目前公认最好的 ARIMA 模型定阶准则, 可以有效地克服模型的过度敏感问题, 提高模型的稳健性^[8]. 其具体表达式为:

$$AIC(k, j) = \ln(\sigma^2(k, j)) + \frac{2(k + j)}{N} \quad (3)$$

式中: $\sigma^2(k, j)$ 表示白噪声方差 σ^2 的估计. 在上述模型识别的基础上, 采用最小二乘估计法计算 ARIMA 模型的未知参数.

(4) 采用正态分布检验法对模型的残差序列是否为白噪声进行检验, 如果有超过 5% 的样本自相关函数绝对值 $|\rho_j| \geq 1.96 / \sqrt{N}$, 说明残差序列不是白噪声, 需重新建立模型.

(5) 利用已通过检验的模型对海堤工程沉降数据进行预测分析.

1.2 利用 RTA 算法对 ARIMA 模型的改进及流程

ARIMA 模型参数 p 和 q 在进行模型定阶时, 需要严格符合模型的要求以保证精度, 阶数越高, 拟合精度越高, 但模型同时存在预测性降低的缺陷, 因此如何在保证预测精度的前提下提高预测长度是模型预测的关键所在. 为了充分利用最新的监测信息, 提高预测精度, 本文在 ARIMA 的模型基础上提出与实时跟踪算法 RTA 结合的改进模型. 其基本思想是, 假设要对时间序列 $\{x_i | i = 1 : n\}$ 进行预测, 先假定预测步长为 m , 利用实测的 n 个监测值 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 预测 n 时刻后的 $\{x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}\}$, 随着后面 m 个实测数据的获得, 剔除最前面的 m 个数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 用 n 个新的实测数据补充到原时间序列中构成 $\{x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_{m+n}\}$ 进行下一步的预测, 保持数据列的等维, 依此类推^[9].

在实际的 ARIMA 建模中, 系统的原始序列数据不一定全部用来建模, 不同维数序列建模, 所得的参数 p, q, b 的值是不一样的, 模型的预测结果也不同, 因而必须选择合适参数的时间序列模型; 同时, 也可以构造合适维数的新陈代谢模型, 每次加入最新的数据, 剔除掉旧数据, 保持序列长度不变, 类推可以建立 ARIMA 的预测模型群. 利用 MATLAB 数学软件^[10] 对 ARIMA-RTA 组合模型进行预测计算, 模型的流程图如图 1 所示.

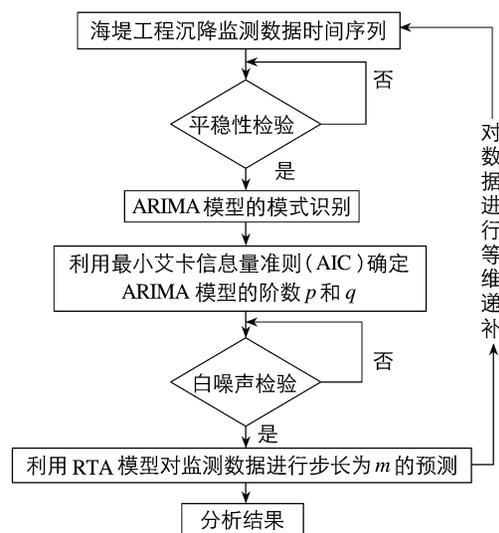


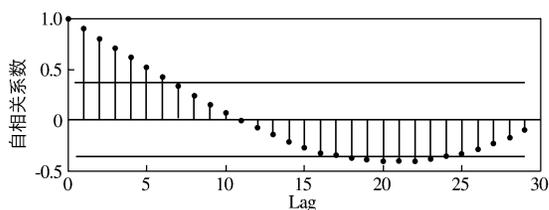
图 1 ARIMA-RTA 组合模型的计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of ARIMA and RTA combined model

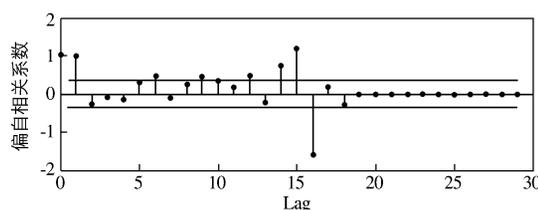
2 工程实例

为了验证 ARIMA-RTA 组合模型预测的可靠性,采用浙江省某围涂工程的施工期海堤监测数据作为研究对象进行验证计算,该堤防建立在淤泥和淤泥质黏土地基上,采用土石结构,地基采用排水板处理.选取该海堤工程 0+166 测点施工期 2008 年 7 月至 2008 年 10 月间 36 个沉降监测数据作为分析对象,此时海堤沉降处于变形发展阶段,原始沉降监测数据间隔时间为 3 d^[11].取前 30 个点作为计算数据,后 6 个数据用以检验,为方便计算,以监测数据的时间先后进行编号($r=1,2,\dots$),可以得到海堤沉降时间序列如图 2 所示.

通过自相关函数(AC)和偏自相关性(PAC)来检验海堤工程沉降时间序列的平稳性(如图 3).



(a) 自相关函数(AC)



(b) 偏自相关函数(PAC)

图 3 海堤工程沉降数据的 AC 和 PAC 系数

Fig. 3 AC and PAC coefficients of the seawall settlement

由图可见,大部分数据的 AC 和 PAC 值都超出允许范围,时间序列的平稳性不满足计算要求,需要进行差分计算.通过差分计算,海堤工程施工期沉降累积位移的一次差分序列、AC 和 PAC 系数如图 4 和 5 所示,由图可见,海堤沉降位移的一次差分序列值趋于稳定,AC 和 PAC 系数也基本在误差允许范围之内.故 ARIMA 模型中的系数 d 定为 1.

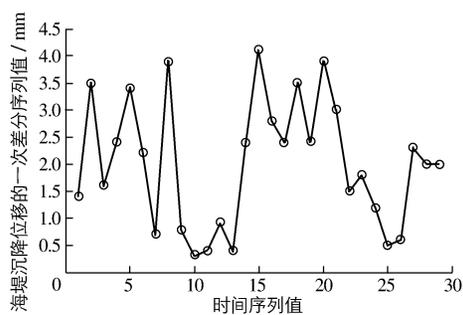
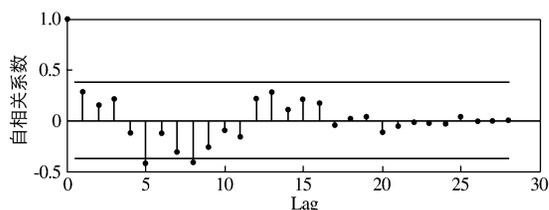
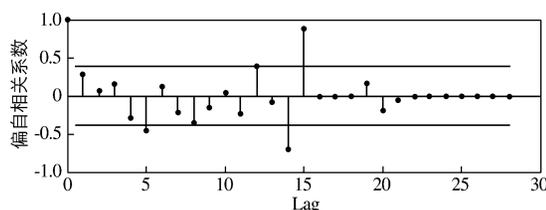


图 4 海堤沉降位移的一次差分序列

Fig. 4 First difference series of the seawall settlement



(a) 自相关函数(AC)



(b) 偏自相关函数(PAC)

图 5 海堤工程沉降数据一次差分序列的 AC 和 PAC 值

Fig. 5 AC and PAC of first difference series of the seawall settlement

然后利用最小艾卡信息量准则(AIC)来确定 ARIMA 模型的阶数 p 和 q .通过计算发现当 $p=4, q=5$ 时,

AIC 值最小,故 ARIMA 模型的 p 值取 4, q 值取 5. ARIMA 模型的表达式可记为:

$$\Phi(B) \nabla x_i = \Theta(B) \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: $\nabla = (1-B)$; $\Phi(B) = 1 - 0.1855B - 0.06519B^2 - 0.8343B^3 - 0.01071B^4$; $\Theta(B) = 1 + 0.3711B + 0.8503B^2 - 1.032B^3 - 0.448B^4 - 0.8085B^5$; ε_i 为白噪声序列.

计算 ARIMA(4,1,5)模型与原时间序列的拟合残差值(如图6),可得模型的拟合残差控制在 2 mm 以内,精度很高.

ARIMA(4,1,5)模型的 p, q 参数值较大,虽然增加了模型的拟合精度,但同时也限制了预测的长度.为了提高预测精度,我们将模型的预测步长设定为 1,利用 ARIMA-RTA 组合模型对时间序列进行等维递补循环运算,计算未来 6 个时间序列的海堤沉降值.并将预测结果与实测值、ARIMA 模型、GM(1,1)模型预测值进行比较(表1).可见,ARIMA-RTA 组合模型与 ARIMA 模型相比,预测精度上有了较大提高,而 GM(1,1)模型对小数据量的中长期预测时存在较大的误差,适用性较差.

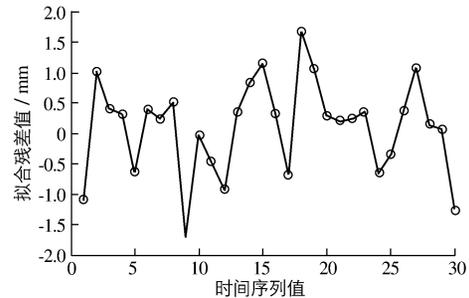


图6 ARIMA 模型与原监测数据的拟合残差值
Fig. 6 Fitting errors of ARIMA model

表1 实测值与 ARIMA-RTA 模型的预测值比较

Tab. 1 Comparison between the measured values and predicted values of ARIMA-RTA model

序 列	实测值/mm	ARIMA-RTA 模型		ARIMA 模型		GM(1,1) 模型	
		测值/mm	误差/%	测值/mm	误差/%	测值/mm	误差/%
31	83.7	82.513	-1.42	80.121	-4.28	90.530	8.16
32	86.4	85.491	-1.05	82.429	-4.60	93.948	8.74
33	87.5	87.180	-0.37	83.280	-4.82	97.496	11.42
34	88.3	89.252	1.08	84.417	-4.40	101.177	14.58
35	89.3	90.907	1.80	86.580	-3.05	104.998	17.58
36	92.6	91.820	-0.84	89.511	-3.34	108.963	17.67

3 结 语

(1) 本文将差分自回归移动平均模型和实时跟踪算法进行组合,建立了 ARIMA-RTA 预测模型,并以浙江省某海堤工程现场采集的监测数据为研究对象进行了实例验算,计算结果证明,ARIMA-RTA 模型在 ARIMA 模型的基础上,通过时间序列的等维递补处理,充分挖掘监测数据本身的非线性动态信息,具有良好抗噪性,能达到较高的预测精度和较好的预测长度,为海堤工程沉降数据的预测分析提供了新的研究思路.

(2) ARIMA-RTA 模型在拟合预测过程中,ARIMA 模型的阶数 p 和 q 的选取、RTA 模型预测步长 m 的选择对预测的精度有很大影响,因此如何对这些参数进行优化有待于今后的进一步研究.

参 考 文 献:

- [1] 秦植海,秦鹏. 海堤地基固结系数反演与工后沉降分形模型预测[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1747-1793. (QIN Zhi-hai, QIN Peng. Consolidation coefficient inversion of seawall foundation and prediction of its post construction settlement based on fractal theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1747-1793. (in Chinese))
- [2] 潘翔,黄铭,王跃威. 海塘渗压监测分析的时间序列组合模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1374-1378. (PAN Xiang, HUANG Ming, WANG Yue-wei. The time series model of sea wall osmotic pressure monitoring analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1374-1378. (in Chinese))
- [3] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. (HE Shu-yuan. Applied time series analysis[M].

- Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 彭涛, 杨岸英, 梁杏, 等. BP 神经网络-灰色系统联合模型预测软基沉降量[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1810-1814. (PENG Tao, YANG An-ying, LIANG Xing, et al. Prediction of soft ground settlement based on BP neural network-grey system united model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1810-1814. (in Chinese))
- [5] 秦鹏, 张喆瑜, 秦植海, 等. 滑坡体监测数据的改进变维分形-人工神经网络耦合预测模型[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 30-34. (QIN Peng, ZHANG Zhe-yu, QIN Zhi-hai, et al. IVDF-ANN prediction model for monitoring data of landslide deformation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 30-34. (in Chinese))
- [6] 李涛, 何承桂, 沈健民. 随工程进展的海堤沉降优选组合预测研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2011, 23(2): 59-61. (LI Tao, HE Cheng-gui, SHEN Jian-min. Superior combination forecasting on seawall settlement with project progress[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2011, 23(2): 59-61. (in Chinese))
- [7] SU Huai-zhi, HU Jiang, WEN Zhi-ping. Structure analysis for concrete-faced rock fill dams based on information entropy theory and finite element method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(8): 1041-1055.
- [8] 何林, 欧进萍. 基于 ARMAX 模型及 MA 参数修正的框架结构动态参数识别[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 47-51. (HE Lin, OU Jin-ping. Dynamic parameter identification of steel frame structure based on ARMAX model and MA parameter updating[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 47-51. (in Chinese))
- [9] 赵洪波, 冯夏庭. 非线性位移时间序列预测的进化-支持向量机方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 468-471. (ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting. Study and application of genetic-support vector machine for nonlinear displacement time series forecasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 468-471. (in Chinese))
- [10] 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. (ZHANG San-wen, LEI Ying-jie, FENG You-qian. MATLAB applied in time series analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press House, 2007. (in Chinese))
- [11] 秦植海, 秦鹏, 方荣. 浙江省典型海堤工后沉降分析报告[R]. 杭州: 浙江省围垦技术中心, 浙江水利水电专科学校, 2009. (QIN Zhi-hai, QIN Peng, FANG Rong. Report of typical seawall post-construction settlement analysis in Zhejiang Province[R]. Hangzhou: The Reclamation Technology Center of Zhejiang Province, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2009. (in Chinese))

Prediction of seawall settlement based on ARIMA-RTA model

QIN Peng^{1,2}, SU Huai-zhi¹, SHEN Yue-jun³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang University of Water Resource and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 3. Surveying and Design Institute of Qiantang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Analysis and prediction of seawall foundation settlement are very important for engineering maintenance and disaster prevention, but there is no unified analytical model because of too many factors influencing the settlement. Based on the seawall monitoring data, the paper makes full use of the good fitness of Autoregressive Integrated Moving Average Model (ARIMA) and dimension-fixed and cursion-compensated idea of Realtime Tracing Algorithm (RTA), and a new model named ARIMA-RTA is developed. As a test, the prediction model is applied to calculating a case of the seawall monitoring data, and the results show that the model has carefully-defined physical conception and thus opens up broad prospects for application to engineering data analysis for high precision and noise immunity.

Key words: seawall; prediction of settlement; ARIMA; RTA