

灰色-时序组合模型在建筑物沉降预测中的应用

鲁玉芬¹, 方从严¹, 开 明²

(1. 芜湖职业技术学院 芜湖市装配式工程技术研究中心, 安徽 芜湖 241002;

2. 芜湖市勘察测绘设计研究院有限责任公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要:为了获得较为准确的建筑物沉降预测结果和较高的预测精度,结合灰色模型、时间序列模型的优点,提出灰色-时序组合模型进行建筑物沉降预测的方法,有效克服了单一模型预测精度低的缺点。以某工程实例沉降观测数据作为原始建模分析数据,通过对灰色预测模型、时间序列预测模型以及组合预测模型的预测结果进行比较分析,结果表明,灰色-时序组合模型预测的沉降值更接近实测值,预测的精度比单一模型更高,具有一定适用性,有利于高层建筑物的沉降预测、预警,确保建筑物的安全性。

关键词:灰色模型;时间序列模型;组合模型;沉降预测

中图分类号:TU196 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)08-0315-04

随着城市建设的快速发展,越来越多的高层建筑物在城市发展空间中层出不穷,一定程度上满足了城市建设发展需求,但由此带来的建筑物的安全问题也不容小觑。受周围工程、环境以及自身地质条件和结构的影响,建筑物必定会产生不均匀变形,一旦变形量超过建筑物的承受范围就会严重影响建筑物的安全,引发一系列的工程质量问题,比如出现建筑物裂缝、倾斜甚至建筑物的坍塌^[1-5]。为了避免由建筑物不均匀沉降引发的工程质量问题,在建筑物施工及运营期间,提前预测建筑物未来的沉降趋势,有助于对那些超出建筑物沉降允许范围的建筑物采取补救措施以控制其沉降量或沉降差,确保建筑物的安全性。因此,针对如何通过建筑物前期沉降观测值来获得较为精确的沉降发展趋势,众多学者提出了自己不同的看法和研究论证成果,主要有卡尔曼滤波法、灰色模型法、人工神经网络法、时间序列分析法、马尔科夫模型法等,每一种方法都从不同的研究角度为建筑物未来的沉降变化趋势提供有用的信息^[6-8]。在这些方法中,灰色模型和时间序列模型在建筑物沉降预测中,因其运用范围比较广、优势凸显、方法比较简单,在大多数建筑物沉降预测分析中被采纳。本文结合这两个模型的各自优势,通过建立灰色-时序组合预测模型来预测建筑物未来的沉降变化趋

势。工程应用案例数据分析证明,灰色-时序组合预测模型累加了传统的单一预测模型各自的优势,获得了精度更高的预测值,在建筑物沉降预测中更具借鉴性和应用前景。

1 灰色 GM(1,1) 预测模型

设建筑物原始沉降量观测值序列为 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$, 对 $X^{(0)}$ 做一次累加生成, 可得生成序列 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$, 其中 $X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), (k = 1, 2, \dots, n)$ 。建立关于序列 $X^{(1)}$ 的一阶微分方程, 则 GM(1, 1) 模型为

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (1)$$

式中, a, b 为灰参数。

通过最小二乘法求得

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (2)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(3) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n) + X^{(1)}(n-1)] & 1 \end{bmatrix};$$

收稿日期:2022-03-22

基金项目:2020 年度安徽高校自然科学研究重大项目(KJ2020ZD73);芜湖职业技术学院科技创新服务平台;装配式工程技术研究中心项目(Kjcxpt202006);安徽省《建筑工程测量》教学示范课(皖教秘高[2020]165 号)。

作者简介:鲁玉芬(1977—),女,安徽桐城人,芜湖职业技术学院,副教授,硕士,研究方向为土木与建筑工程。

$$Y = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix}.$$

将 a 、 b 的估值代入方程(1)可得 GM(1,1)模型的解

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (3)$$

对式(3)做累加得到

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a) \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak}, \\ k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

灰色模型虽然能够实现预测建筑物沉降变化,但其存在的缺陷是随着工期的延长和观测数据的增加,预测精度会逐渐下降。而随着城市化建设进程的加快,越来越多的高层建筑物的建设周期都比较大,沉降量和沉降变化趋势都很不稳定,因此,单一的灰色模型对于高层建筑物而言,难以获得高精度预测值^[9-11]。

2 时间序列预测模型

时间序列就是将观测数据按照观测时间顺序依次排列组成的序列,其预测方法是根据已建建筑的沉降观测数据或在建建筑物的前期沉降观测数据,对同期新建建筑物或已建建筑物后期沉降发展趋势进行预测^[11]。常用的时间序列模型主要包括自回归模型 AR(n)、移动平均模型 MA(m)、自回归移动平均模型 ARMA(n, m)^[12]。设 $\{X_t\}$ 序列是一个平稳、正态、零均值的时间序列,那么可以用 X_t 的历史样本 $\{X_{t-n}\}$ 以及现在和过去的误差值 $\{\alpha_t\}$ 来表示序列值 X_t ,根据多元线性回归的原理,可得到最一般的自回归滑动平均模型 ARMA(n, m)。

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_n X_{t-n} - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_m \alpha_{t-m} + \alpha_t \quad (5)$$

式中: $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 称为自回归系数, n 为自回归模型的阶数; $\theta_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 称为滑动平均系数, m 为滑动平均模型的阶数; $\{\alpha_t\}$ 为白噪声序列。

当 $\theta_j = 0$ 时,自回归滑动平均模型 ARMA(n, m)变为自回归模型 AR(n),即

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_n X_{t-n} + \alpha_t \quad (6)$$

当 $\varphi_i = 0$ 时,自回归滑动平均模型 ARMA(n, m)变为滑动平均模型 MA(m),即

$$X_t = \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_m \alpha_{t-m} \quad (7)$$

因为有效的观测数据才能构成时间序列模型的历史数据,因此使用该模型之前首先要进行数据

预处理,消除周期性数据和趋势性数据,以满足该模型平稳性要求。然后依据自相关函数和偏相关函数的截尾性和拖尾性做判断,选择最相似的模型结构对预处理后的数据序列变化过程进行模式识别。其模型阶数通过定阶方法确定后,模型参数 φ 、 θ 可以通过最小二乘估计法获得。最后为了检验确定的时间序列模型的适用性,可以通过判断模型的残差序列是否为白噪声序列来检验,检验合格的模型才能作为沉降预测模型,这样的模型获得的预测值才具有一定的参考价值^[11]。因此,要成功获得这样的时间序列模型,前期的原始数据的采集要求比较高,需要取得足够多的野外作业沉降观测数据,这往往会造成沉降监测工作量加大,同时,该模型需要对数据进行得当处理才能确定能够较为真实反映沉降情况的模型,而引起建筑物沉降变形的因素比较多,在数据处理上存在一定难度,从而导致单一的时间序列模型在沉降应用方面存在一定局限性。

3 灰色-时序组合预测模型

灰色预测模型针对一些比较平稳的模型中会有较好的预测结果,针对不太平稳的模型,只有在监测沉降数据周期比较短、数据少的时候,预测结果较好,但随着沉降数据监测周期的延长、数据的增多,其预测精度会有所降低。时间序列预测模型可以考虑更多的引发沉降的事件因素,获取的沉降监测数据越多,对后期沉降预测模拟精准度越高。因此,建立灰色-时序组合预测模型,既能弥补灰色预测模型和时间序列预测模型这两种单一预测模型的不足之处,又能结合它们各自的优势,来增加预测模型的精准度。本文利用灰色 GM(1,1)预测模型和时间序列预测模型通过经典定权法来分配权重,通过权重计算来进行模拟预测,最终获得最佳预测结果的组合模型,其具体方法如下:

组合预测模型为

$$\xi = \sum_{i=1}^n \varphi_i f_i(k) \quad (8)$$

式中: ξ 为组合预报模型最终预测结果; $f_i(k)$ 为同一时刻 k 各种不同类型的单一预测模型的预测结果; φ_i 为需要考虑分配的对应的单一模型分配的权值。

假设实测序列数据为 $\{x_i\}$,各单一预测序列为 $\{\bar{x}_i\}$,算出模型对应的预测误差 $e_i = x_i - \bar{x}_i$,由经典定权定义法,求算出各单一预测模型误差序列的方差 σ_i^2 ,最终可以获取经典的定权公式

$$\psi_1 = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2}} \tag{9}$$

4 组合预测模型工程实例应用

以芜湖市某小区 20 层高的 30# 楼为研究对象,采用徕卡 DNA03 电子水准仪,配合 2-条码水准尺进行二等精密水准测量,监测点分别设置在建筑物外墙柱子上和房屋室内外地坪±0.000 以上位置,编号为 CJ01-CJ06,构成环形闭合路线。为了减少沉降监测数据本身误差,外业监测数据采用同一测量员、同一测量仪器、同一监测路线对不用建设周期进行沉降数据监测。外业沉降数据监测、原始数据记录和内业数据平差计算等均严格执行二等水准测量《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897—2006)技术要求和《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016)的有关要求和沉降观测的需要,外业观测数据或内业数据处理结果一旦超限就重测。

本次沉降监测以 30# 楼第 1~5 期沉降量为原始数据,在此数据基础上预测第 6 期沉降变化规律及其发展趋势。在数据处理过程中,对原始数据采用奇异值“3σ”准则进行预处理,对观测中出现了奇异值进行剔除,并检核原始测量数据累计沉降量,未出现初差值现象,说明第 1~5 期采集的原始监测数据较为理想,可以作为灰色-时序组合预测模型的建模数据。

通过建立灰色-时序组合预测模型对 30# 楼第 6 期沉降数据进行预测,其预测结果如图 1 所示。由图 1 可见,与实测累计沉降值相比较,灰色-时序组合预测模型获得沉降预测值比单一的灰色预测模型和时间序列预测模型获得的沉降预测值,其结果更接近实测沉降值,说明其沉降预测结果可靠性更高,更具适用性。为进一步研究该组合预测模型的预测精度,对单一模型和组合模型预测结果的残差对比分析(图 2),由图 2 可见,灰色-时序组合预测模型总体残差值相对较小,其最大残差值为 0.1 mm;而单一的灰色预测模型和时间序列预测模型,其残差值相对于组合预测模型要大,如灰色预测模型,残差值最大为 0.23 mm。由此可见,灰色-时序组合预测模型克服了单一模型的不足点,并发挥了各自的优点,形成的组合模型对建筑物沉降预测精准度更高,与实际沉降值更为接近,有一定的借鉴价值。

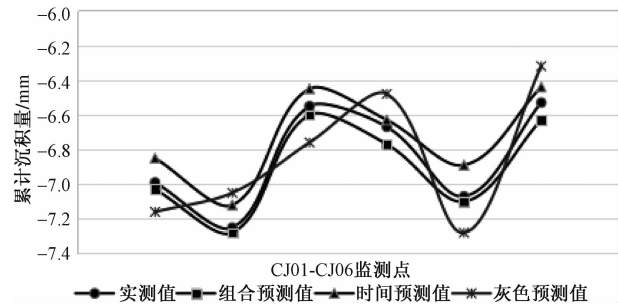


图 1 累计沉降量预测值

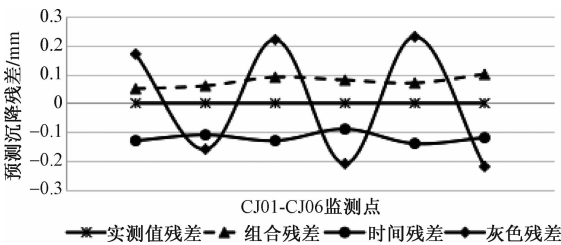


图 2 预测沉降残差值

5 结论和建议

1)通过挖掘单一的灰色 GM(1,1)模型和时间序列模型的有效信息,弥补各自不足、叠加各自优点,通过运用经典定权法建立的灰色-时序组合预测模型被应用在实际工程实例中,实际工程分析数据表明,该组合模型预测的沉降值更接近实际沉降量,预测残差值更小,预测精度更高,可以获得更可靠预测结果分析,在未来建筑物沉降预测中具有一定可行性和适用性。

2)本文只尝试了利用两种单一模型建立组合预测模型,而在工程实践中,能够进行建筑物沉降预测的单一模型比较多,如果利用更多的单一模型各自优势,建立 3 种以上的单一模型的组合模型,其预测效果会更好,尤其对地质条件比较复杂的建筑物地基,影响建筑物沉降的因素比较多,这种多模型建立的组合预测模型更具借鉴和使用价值。

参考文献

[1] 刘江,王征博,刘成,等. 灰色-时序组合模型在建筑沉降预测中的应用[J]. 北京测绘,2018,32(2):214-217.
[2] 王天应,徐亚明. 超高层建筑动态特性监测方法研究[J]. 测绘通报,2017(4):89-92,144.
[3] 袁长丰,刘颖,李聪明,等. 超高层建筑施工过程沉降特征分析[J]. 测绘科学,2017,42(7):172-177.
[4] 丁宁,孙英君,崔健,等. 高层建筑物变形监测数据处理与分析[J]. 测绘科学,2011,36(5):93-94.
[5] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 软土地区基坑开挖引起的浅基

础建筑沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2104, 36(S2): 325-329.

[6] 赵杰,花向红,刘闯,等. ARIMA-BP 组合模型在高铁沉降预报中的应用研究[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(4): 54-56.

[7] 魏健,胡吉平,谭衢霖,等. BP 神经网络在高层建筑沉降预测中的应用[J]. 北京测绘, 2013, 27(2): 25-27.

[8] 徐卫东,伍锡锈,欧海平. 基于时间序列分析和灰色理论的建筑物沉降预测模型研究[J]. 测绘地理信息, 2012, 37(6): 23-25.

[9] 朱军桃,李亚威,熊东旭,等. 建筑物沉降监测中的改进灰色模型[J]. 测绘科学, 2017, 42(11): 85-91.

[10] 陈德立,陈辉. 基于 GM(1,1) 模型的建筑沉降预测方法[J]. 福建建设科技, 2017(6): 1-2, 5.

[11] 王璐,桂占飞. GM-ARMA-BP 组合模型在建筑物沉降预测中的应用[J]. 北京测绘, 2019, 33(9): 1038-1041.

[12] 赵利民,高昂,齐永波,等. 基于时间序列分析的露天矿边坡沉降预测模型[J]. 测绘工程, 2017, 26(9): 46-50.

Application of Combined Grey-time Series Model in Building Settlement Prediction

LU Yufen¹, FANG Congyan¹, KAI Ming²

(1. Wuhu Assembly Engineering Technology Research Center, Wuhu Institute of Technology, Wuhu Anhui 241002, China;
2. Wuhu Surveying and Mapping Design Institute Co. Ltd., Wuhu Anhui 241000, China)

Abstract: To get more accurate prediction results and higher prediction accuracy, combined with the advantages of grey model and time series model, a grey time series combined model is proposed to predict building settlement, which effectively overcomes the shortcomings of low precision of single model. Taking a project as example, and based on its data first mock exam data of a project, the comparison between the grey prediction model, the time series prediction model and the combined forecasting model is carried out. The results show that the settlement value predicted by the grey time series composite model is closer to the actual measurement value, and the prediction accuracy is higher than that of the single model, which is applicable to the prediction and early warning of the high-rise building settlement. The safety of the building is ensured.

Keywords: grey model; time series model; combination model; settlement prediction