

# Analysis and Prediction of Building Settlement Deformation Based on AR Model

Tao Zhang, Meng Chen, Jindong Li

Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong  
Email: taozhang9106@163.com

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 27<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

With the acceleration of China's urbanization process, the rapid completion of high-rise buildings at the same time, its security issues are increasingly prominent. Autoregressive model (AR), as an important time series analysis method, can better reflect the rule of building settlement deformation change with time. In this paper, the settlement deformation of building is analyzed with an engineering example, and the autoregressive model is used to predict the amount of deformation.

## Keywords

Building, Settlement Deformation, Autoregressive Model, Analysis and Prediction

---

# 基于AR模型的建筑物沉降变形分析预测

张 涛, 陈 梦, 李晋东

山东科技大学, 山东 青岛  
Email: taozhang9106@163.com

收稿日期: 2019年3月12日; 录用日期: 2019年3月27日; 发布日期: 2019年4月3日

---

## 摘 要

随着我国城市化进程的加快, 高楼飞速建成的同时, 其安全问题日益突出。自回归模型(AR), 作为一种重要的时序分析方法, 能较好反映建筑物沉降变形量随时间的变化规律。本文结合工程实例, 分析建筑沉降变形, 利用自回归模型对变形量做出预测, 对比实际观测值, 验证了其有效性。

## 关键词

建筑物, 沉降变形, 自回归模型, 分析预测

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国城市建设的飞速发展, 高楼林立, 其结构形式和建筑环境越发复杂。越高的建筑必然有着越高的安全风险, 设计和施工不当会带来巨大隐患, 于是建筑物的变形监测成为保证建筑物安全的必要环节。高层建筑物的一个重要危害就是不规则沉降, 对沉降量的观测与预测是涉及多门学科的研究工作, 特别对变形量的预测与分析, 关系着建筑的安危, 不能懈怠[1]。

时间序列方法运用到变形预测是近年来一个热点。缪海波[2]利用时间序列分析方法, 建立了滑坡变形预测模型, 以三峡库区秭归县白水河滑坡为例, 通过对变形预警区监测点位移实测时间序列的分析, 判断白水河滑坡未来的变形发展趋势。陈绍桔[3]将边坡位移看成是一系列时间序列, 采用时间序列模型, 对其进行模型识别、参数估计、位移预报, 预测结果表明时间序列分析模型能较好地反映边坡位移变形的动态变化规律, 准确预报出边坡位移的发展趋势。兰孝奇[4]利用时间序列分析模型结合建筑物沉降监测的具体实例进行了时间序列的分析与预报, 也取得了较好的结果。

本文结合工程实例, 分析沉降变形量, 以提前预知建筑物的健康状态, 利用自回归模型对变形量进行预测, 估计建筑物的沉降趋势, 在出现安全隐患之前做出相对的防护措施。

## 2. 沉降观测方案设计

### 2.1. 水准测量方法

建筑物的变形速率和特点, 决定了沉降监测方案的不同。根据监测精度和安全指标, 将沉降观测方法分为以下几种:

#### 1) 精密水准测量

精密水准测量一般是使用精密水准仪配合钢瓦尺, 完成水准基点和变形点的观测, 其作业方法与水准测量相同。

#### 2) 精密高程三角测量

民用建筑项施工现场较为复杂, 水准测量难以施测时, 可使用高精度的短程电磁波测距三角高程测量代替。

#### 3) 液体静力水准测量

其原理是: 将要用到的全部容器连接在一起, 在容器中加入流体, 使得其可以自由流通, 平衡时液面都在同一水平面, 根据各个监测点沉降的值不同, 反映在容器内的液体深度的不同, 确定各个点的高程变化。

### 2.2. 监测精度及频率设计

变形监测的周期以能够系统反映建筑物的变化过程而不遗漏其他变化时刻为原则, 根据单位时间变

形量的大小及外界因素的影响来确定, 并要随建筑物荷载的变化而变化[5]。对于濒临破坏的建筑物, 或者是即将产生滑坡、崩塌的地面, 其形变速率会逐渐加快, 监测周期也要相应地逐渐缩短。

为了使观测数据可靠, 确保建筑物的安全, 应使沉降量不超过某个预定值, 误差中误差应小于沉降观测允许的 1/10-1/20, 当观测条件允许, 应使用更先进的仪器设备和方法, 保证达到更高精度。

对于高层建筑物的沉降观测, 要求相同后视点两次所得的后视差不得超过 $\pm 1$  mm, 闭合水准路线限差为 $\pm 1\sqrt{n}$  mm ( $n$  为测站数)。对于普通建筑物, 相同后视点两次所得后视差不得超过 $\pm 2$  mm, 水准路线的闭合差不得超过 $\pm 2\sqrt{n}$  mm。

### 2.3. 水准基点和沉降监测点的布设

基准点是变形监测系统的基本控制点, 是为进行观测而布设的、稳定的、需长期保存的测量控制点, 通常埋设于变形区域外的基岩上, 能长期保存处于稳定状态[6]。每个工程一般应建立至少 3 个基准点, 以便相互检校, 确保坐标系统的统一, 垂直位移基准点宜采用双金属标或钢管标。

工作点又称工作基点, 是水准基点与变形监测点之间起联系作用的点。工作基点埋设在被研究对象附近, 要求在观测期间保持点位稳定。

沉降观测点是能反映建筑物变性特征的测量点, 可以根据测定沉降监测点的变化来判断建筑物的沉降与位移[7]。

民用建筑物沉降监测点一般布设在建筑物的以下位置:

- 1) 在建筑物主要墙角处或沿外墙每 10 m~15 m 处或每隔 2~3 根柱基上;
- 2) 沉降缝、伸缩缝、新旧建筑物接壤处的两侧;
- 3) 当建筑物出现裂缝时, 布设在裂缝的两侧;

4) 建筑物沉降监测点标志的埋设位置应避开雨水管、窗台先、暖气管线和暖气片、电器开关等有碍设标语监测的障碍物, 并应视立尺需要离开墙(柱)面和地面一定距离。所有监测点均应统一编号, 并注记在各建筑物的平面图上。

## 3. 自回归模型

时间序列分析, 也称时间数列分析或动态数列分析, 反映了要素随时间变化的发展过程, 是一种动态数据处理方法, 建立在输出等价的基础上, 揭示出其本身的结构和规律[8]。自回归模型是时间序列分析中一个重要内容, 而被广泛应用[9]。

### 3.1. 自回归模型 AR(p)

时间序列  $\{X_t\}(t=1,2,\dots,n)$  的自回归模型为

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

其中,  $X_t$  为因变量;  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$  是自变量, 显然它们是同一变量不同时刻的取值;  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$  称为自回归系数;  $p$  为模型的阶;  $\varepsilon_t$  是误差或残差项, 为白噪声序列, 即  $\varepsilon_t$  的数字期望  $E(\varepsilon_t) = 0$ , 方差均为  $\sigma^2$ , 各  $\varepsilon_t$  间不相关。

### 3.2. 参数估计

由式(1)得误差方程为:

$$V_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - X_t \quad (t = p+1, p+2, \dots, p+n) \quad (2)$$

其矩阵形式为

$$V = B\Phi - L \quad (3)$$

式中,

$$B = \begin{bmatrix} X_p & X_{p-1} & \cdots & X_1 \\ X_{p+1} & X_p & \cdots & X_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{p+n-1} & X_{p+n-2} & \cdots & X_N \end{bmatrix}$$

$$\Phi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \cdots \quad \varphi_p]^T$$

$$L = [X_{p+1} \quad X_{p+2} \quad \cdots \quad X_{p+n}]^T$$

在  $V^T V = \min$  下, 模型参数最小二乘解为

$$\hat{\Phi} = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (4)$$

### 3.3. 模型阶数 $p$ 的确定

在建筑物变形分析中, 如采用 AR 模型, 阶数  $p$  可由线性假设法予以确定。线性假设法[10]的原理是: 先设阶数为  $p-1$ , 进行平差, 求得残差平方和  $\Omega_{p-1}$ , 再设阶数为  $p$  进行平差, 将求得的残差平方和  $\Omega_p$ , 与  $p-1$  阶进行比较, 如果结果差别并不显著,  $p$  阶不必考虑, 即采用  $p-1$  阶为宜。其平差模型在式(2)式下再附加线性条件

$$\varphi_p = 0 \quad (5)$$

联合式(2)和式(5)式平差, 即为  $p-1$  阶模型, 求得残差平方和  $\Omega_{p-1} = (V^T V)_{p-1}$ 。

不考虑式(5)式, 即  $P$  阶模型, 平差得  $\Omega_p = (V^T V)_p$ , 于是有

$$\Omega_{p-1} = \Omega_p + R \quad (6)$$

作  $F$  检验统计量

$$F = \frac{R}{\Omega_p / (n - 2p)} \quad (7)$$

选定显著水平  $\alpha$ , 查  $F$  分布表得分位值  $F(\alpha, 1, n-2p)$ , 如果  $F > F(\alpha, 1, n-2p)$ , 则线性假设不成立, 应采用  $p$  阶, 否则采用  $p-1$  阶。

## 4. 工程实例

建筑物建设场地位于万盛经开区塔山境内, 东侧、南侧为道路。南西南侧为蒲河, 河宽 47 m, 河水流向由东南向西北流, 流向  $319^\circ$ , 勘察期间河水位较低, 水位标高为 294.00 m, 据调查、访问该河水最高洪水位标高为 296.50 m, 位于拟建物设计标高以下, 对拟建建筑物的影响较小, 河岸未加固, 河岸目前未见变形、裂缝等, 现状稳定。

在建场地所处地貌单元为构造剥丘陵地貌, 地形较为平缓, 地表坡度约为  $2^\circ \sim 5^\circ$ , 地势总趋势为东侧高、西侧低, 北侧高南侧低。拟建地段地面高程 307.85 m~310.18 m, 最大高差 2.33 m。场地东侧有房屋分布, 多为砖混结构, 距离 11.0 m。

场地根据现场实际情况, 在东侧道路上布设了 2 个基准点, 编号为 BM1~BM2。在建墙体离地面 0.5 米处布沉降观测点, 共设置地面变形观测点 6 个, 编号 SC1~SC6, 由于在施工单位建设的过程中 SC3、SC4、SC5 三个监测点被破坏, 12 月 12 日重新布设 SC3、SC4、SC5 三个监测点。沉降监测点平面布置如图 1。



**Figure 1.** Plane layout of settlement monitoring points  
**图 1.** 沉降监测点平面布置图

根据整理后的观测数据,以观测点相邻两次观测值之差与最大误差(取中误差的两倍)进行比较,如观测值之差小于最大误差则可认为观测点在这一周期内没有变动或变动不显著。但要注意,即使每相邻周期观测值之差很小,当利用回归方程发现有异常观测值和呈现一定趋势时,也应视观测点有异常。监测点累计沉降位移监测成果如表 1,全部点 17 期沉降值折线图如图 2。

**Table 1.** Accumulated settlement displacement monitoring results of monitoring points (unit: mm)

**表 1.** 监测点累计沉降位移监测成果(单位: mm)

测点编号		SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
第 1 期	10 月 14 日	0	0	0	0	0	0
第 2 期	10 月 25 日	0	-0.1	-0.1	0	0	0
第 3 期	11 月 6 日	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	-0.1
第 4 期	11 月 15 日	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
第 5 期	11 月 25 日	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
第 6 期	12 月 3 日	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2
第 7 期	12 月 12 日	-0.4	-0.3	0	0	0	-0.3
第 8 期	12 月 25 日	-0.4	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.4
第 9 期	1 月 7 日	-0.5	-0.5	-0.2	-0.1	-0.1	-0.4
第 10 期	1 月 17 日	-0.6	-0.5	-0.3	-0.3	-0.2	-0.5
第 11 期	1 月 26 日	-0.6	-0.6	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5
第 12 期	2 月 5 日	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.6
第 13 期	2 月 15 日	-0.7	-0.7	-0.4	-0.3	-0.4	-0.6
第 14 期	2 月 25 日	-0.8	-0.7	-0.4	-0.4	-0.4	-0.7
第 15 期	3 月 7 日	-0.8	-0.8	-0.5	-0.4	-0.4	-0.7
第 16 期	3 月 19 日	-0.9	-0.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6
第 17 期	3 月 27 日	-0.9	-0.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.9

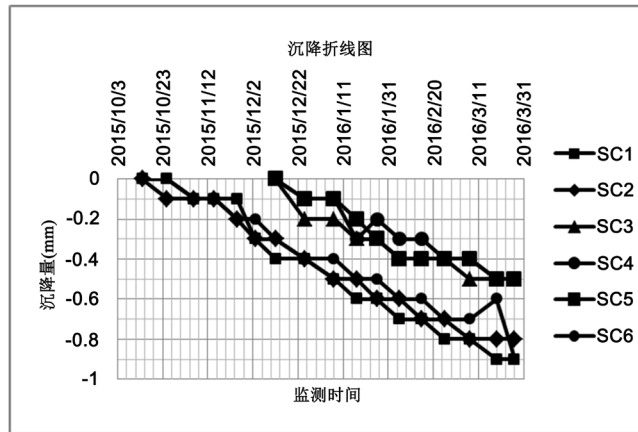


Figure 2. Monitoring point settlement broken line diagram  
图 2. 监测点沉降折线图

根据本阶段监测结果显示, 2015 年 12 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日, 建筑监测点整体呈下降趋势, 其中原有布设的 SC1、SC2、SC6 三个监测点均下沉了 0.4 mm; 新布设的 SC3、SC4、SC5 三个点中, 沉降量最大的监测点为 SC4、SC5, 沉降量为 0.1 mm。从累计沉降-时间折线可以看出, 建筑物监测点 SC1~SC6 虽整体成下沉趋势, 但沉降量较小且为均匀沉降, 说明建筑在增加荷载后有轻微均匀沉降, 属于安全状态。

接着利用自回归模型对各点的观测高程值进行估计, 各期观测高程如表 2。

Table 2. Observation elevation records of each point in the 17th period (unit: m)  
表 2. 各点 17 期的观测高程记录表(单位: m)

点号	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	
第 1 期	10 月 14 日	201.4563	201.4844	201.578	201.4412	201.4418	201.528
第 2 期	10 月 25 日	201.4563	201.4843	201.5779	201.4412	201.4418	201.528
第 3 期	11 月 6 日	201.4562	201.4843	201.5779	201.4412	201.4418	201.5279
第 4 期	11 月 15 日	201.4562	201.4843	201.5779	201.4411	201.4417	201.5279
第 5 期	11 月 25 日	201.4562	201.4842	201.5778	201.4411	201.4416	201.5278
第 6 期	12 月 3 日	201.456	201.4841	201.5777	201.441	201.4416	201.5278
第 7 期	12 月 12 日	201.4559	201.4841	201.5118	200.8889	201.2573	201.5277
第 8 期	12 月 25 日	201.4559	201.484	201.5116	200.8888	201.2572	201.5276
第 9 期	1 月 7 日	201.4558	201.4839	201.5116	200.8888	201.2572	201.5276
第 10 期	1 月 17 日	201.4557	201.4839	201.5115	200.8886	201.2571	201.5275
第 11 期	1 月 26 日	201.4557	201.4838	201.5115	200.8887	201.257	201.5275
第 12 期	2 月 5 日	201.4556	201.4838	201.5114	200.8886	201.2569	201.5274
第 13 期	2 月 15 日	201.4556	201.4837	201.5114	200.8886	201.2569	201.5274
第 14 期	2 月 25 日	201.4555	201.4837	201.5114	200.8885	201.2569	201.5273
第 15 期	3 月 7 日	201.4555	201.4836	201.5113	200.8885	201.2569	201.5273
第 16 期	3 月 19 日	201.4554	201.4836	201.5113	200.8884	201.2568	201.5274
第 17 期	3 月 27 日	201.4554	201.4836	201.5113	200.8884	201.2568	201.5271

通过线性假设法,确定了自回归模型阶数为2,再考虑到SC3、SC4、SC5观测数据不足,所以仅利用自回归模型计算SC1、SC2和SC6点16期与17期的预测值,如表3。

**Table 3.** Comparison of predicted value and measured value (unit: m)  
**表 3.** 预测值与实测值对比(单位: m)

点号	16期预测值	16期实测值	差值(mm)	17期预测值	17期实测值	差值(mm)
SC1	201.4554908	201.4554	-0.0908	201.45548	201.4554	-0.0806
SC2	201.4836446	201.4836	-0.0446	201.48362	201.4836	-0.0218
SC6	201.527478	201.5274	-0.078	201.52717	201.5271	-0.0676

从上面数据可以看出,测值与实测值相差不大,说明模型正确,可以有效地预测下期建筑物的沉降值,有效地防治由于建筑不均匀沉降而带来的安全隐患,保障了人们的人身财产安全。

## 5. 结论

通过对沉降数据的分析和预测,可以对建筑物的安全状态进行监视,数据的预测也能及时发现测量上的错误。在一定程度上,变形监测还能够验证变形体的施工与设计参数。在本文实例中,各沉降观测点都是均匀沉降,并且利用自回归模型能有效预测下一期的沉降形变量,证明了该模型的有效性。但在变形监测中一旦发生异常数值,应该引起足够重视,并采取相应的防护措施来保证建筑物的安全运营。

## 参考文献

- [1] 孙雅荣,吕品. 浅谈高层建筑的沉降观测[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(6): 104-106.
- [2] 缪海波,殷坤龙,柴波,等. 基于非平稳时间序列分析的滑坡变形预测[J]. 地质科技, 2009, 28(4): 107-112.
- [3] 陈绍桔. 边坡非线性位移预测的动力系统自记忆模型[J]. 福建建筑, 2008(6): 154-157.
- [4] 兰孝奇. 时序分析在变形监测数据处理中的应用[J]. 工程勘察, 2004, 3(增刊): 61-62, 69.
- [5] 郑志勇,张光华. 高大型建筑物沉降监测的方法及精度分析[J]. 地矿测绘, 2005, 21(3): 20-21.
- [6] 独知行,靳奉祥,冯遵德. 高层建筑物整体变形观测及分析方案[J]. 工程勘察, 2000(2): 55-58.
- [7] 赵言,花向红,翟高鹏. GM(1,1)与自回归模型在位移监测中的应用[J]. 城市勘测, 2011(3): 115-118.
- [8] 梅红,岳东. 时间序列分析在变形监测数据处理中的应用[J]. 现代测绘, 2005, 28(6): 14-16.
- [9] 史玉峰,孙保琪. 时间序列分析及其在变形数据分析中的应用[J]. 金属矿山, 2004(8): 13-15.
- [10] 陆立,胡晓丽,王春华. 用时间序列分析法进行建筑物沉降观测数据处理的研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 77-79.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-549X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [gst@hanspub.org](mailto:gst@hanspub.org)