

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.05.036

深基坑坑周土体水平位移预测模型的研究与改进

王铁生¹,冯康¹,陈正威²

(1.华北水利水电大学,河南郑州450011;

2.中水顾问集团贵阳勘测设计院,贵州贵阳550000)

摘要:深基坑工程的变形预测意义重大。为了更好的对其变形进行预测,以某大楼深基坑工程为例,针对深基坑坑周土体水平位移预测进行模型的建立与研究,建立了 Verhulst 模型,并运用小波理论对原始数据进行降噪处理,建立了基于小波的 Verhulst 模型,进一步得到降噪前后的预测结果。通过与 GM(1,1)模型对比分析,得出了以下结论:降噪前 Verhulst 模型预测精度为一级,优于 GM(1,1)模型;基于小波降噪的 Verhulst 模型使预测误差进一步减小;小波 Verhulst 模型可用于深基坑坑周土体水平位移的预测,并体现出了较好的优越性。

关键词:深基坑;Verhulst 模型;GM(1,1)模型;小波降噪;水平位移预测

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2015)05—0185—05

Research and Improvement of the Horizontal Displacement Prediction Model of the Soil Mass Adjacent to Deep Foundation Pits

WANG Tiesheng¹, FENG Kang¹, CHEN Zhengwei²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China;

2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: The deformation prediction of deep foundation pits is of great significance. In order to better forecast the deformation, the Verhulst model of a high-rise building foundation pit was established to predict the horizontal displacement of the soil mass around the pit. And then the original surveying data of the displacement was denoised with the wavelet theory. Based on which, a new wavelet denoised Verhulst model was constructed. By the comparison of the prediction data of Verhulst models and the conventional GM(1,1) model, it is drawn that the accuracy of the Verhulst model before denoising is classified as first grade, which is better than that of the GM(1,1) model. Moreover the Verhulst model based on wavelet denoising can furtherly reduce the prediction error. Therefore wavelet denoised Verhulst model performs well in the prediction of the horizontal displacement of the soil mass around the foundation pits.

Keywords: deep foundation pit; Verhulst model; GM(1,1) model; wavelet denoising; horizontal displacement prediction

深基坑的开挖作为大型建筑物施工的一项基础性工作,开挖过程中基坑的稳定与否,不仅关系到基坑本身安全,也会对基坑周围土体及建筑物产生重大影响,深基坑工程变形预测的重要性则不言而喻。

Verhulst 模型作为经典模型之一,被广泛应用到变形预测领域。张庆伟等^[1]利用该模型对复合地基

沉降进行了预测,预测结果较为满意。高良博等^[2]利用该模型对地铁竖井沉降进行了预测,并通过与 GM(1,1)模型预测结果对比分析,得出 Verhulst 模型的优越性。赵小雅等^[3]利用该模型对采空区顶板下沉量进行了预测,结果表明该模型对采空区顶板下沉趋势预测具有很好的适用性。赵福洪等^[4]利用该

模型对高层建筑物的沉降进行了预测,得到了满意的结果。陈正威等^[5]利用该模型对深基坑周土体水平位移量进行了预测,结果表明该模型可以用来对深基坑周土体水平位移量进行预测。

由于单一 Verhulst 模型在预测效果上多多少少存在不足之处,许多学者开始寻求方法对其进行改进,以求达到更好的预测效果。陈建宏等^[6]利用改进参数求解方法的 Verhulst 模型对软岩巷道顶板的位移进行预测,取得了满意的预测结果。周德强等^[7]利用 LS-SVM 算法来改进该模型,使得预测精度大大提高。针对文献^[5]中利用单一 Verhulst 模型进行预测的不足之处,为了进一步提高预测结果的精度与可靠性,本文提出并研究了利用小波降噪与 Verhulst 模型相结合,建立基于小波降噪的 Verhulst 模型,通过与传统 GM(1,1)模型进行对比分析,得出了一些结论。

1 GM(1,1)和 Verhulst 模型理论^[8]

Verhulst 模型可以说是对传统 GM(1,1)模型的改进,传统 GM(1,1)模型基本理论这里不在赘述,主要介绍 Verhulst 模型,此模型常用于人口预测、生物繁殖预测、产品经济预测等。

设某一原始序列:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

对其进行一次累加得生成序列:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (2)$$

$$\text{其中, } x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$z^{(1)}$ 为 $x^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列:

$$z^{(1)} = (z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \dots, z_n^{(1)})$$

$$z_k^{(1)} = 0.5(z_k^{(1)} + z_{k-1}^{(1)}), k = 2, 3, \dots, n$$

则 Verhulst 模型相应的白化方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b(x^{(1)})^2 \quad (4)$$

设 $\hat{\alpha} = (a, b)^T$ 为待估参数向量,可利用最小二乘法求解:

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_2^{(1)} & (z_2^{(1)})^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z_n^{(1)} & (z_n^{(1)})^2 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

式(4)的连续时间响应为:

$$x^{(1)}(k) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) + (a - bx^{(1)}(0))e^{ak}} \quad (5)$$

模型的时间响应序列为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) + (a - bx^{(1)}(0))e^{ak}} \quad (6)$$

将式(6) $x^{(1)}(0)$ 替换为 $x^{(0)}(1)$ 公式变为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(0)}(1)}{bx^{(0)}(1) + (a - bx^{(0)}(1))e^{ak}} \quad (7)$$

累减还原式变为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (8)$$

2 小波降噪

大型建筑的变形监测数据一般包括有用信号和噪声信号^[9]。在测量中,一般认为数据中的噪声服从的是正态分布的白噪声。则深基坑变形监测过程中的观测数据的两部分可用具体模型写为:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (9)$$

在式(9)中, $x(t)$ 是观测数据; $s(t)$ 是变形数据; $n(t)$ 看为随机噪声。即 $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 。在变形数据 $s(t)$ 中,即有可能是实际变形的信号 $s_d(t)$,也有可能是噪声信号 $s_n(t)$ (如仪器对中误差,照准误差等),也有可能是两者的混合,即:

$$s(t) = s_d(t) + s_n(t) \quad (10)$$

小波通过一定准则可将待分析信号划分成不同频带的信号。分出的信号中,低频信号或者是一些比较平稳的信号就是我们需要的“变形信号”。而观测带来的噪声信号主要集中在小波分解的高频信号部分。设原始信号的分析频率为 f ,在尺度参数 $j = 1, 2, \dots, J$ 下,利用小波进行多层次分解,那么所得结果对应频带数就是 $2^{J[10]}$,与结果相应的频率范围是:

$$2^J(i-1)f \sim 2^{-J}if \quad (11)$$

在公式(11)中,分解信号的频率序列表示为 $i = 1, 2, \dots, 2^J$ 。其中式中包括了整个频率 f 不重叠频带信息。在此情况下,我们可以有针对性地对各个不同频带的某个频带的信号分解结果进行重构,从而实现这个频带信号与噪声之间的分离,实现信号的降噪^[11]。

变形监测降噪大致可分为以下三步:

(1) 小波分解。确定问题后选取恰当的小波,并构造变换矩阵,确定分解层数,实现信号的小波分解。

(2) 分解系数阈值处理。原始信号经小波分解后得到的高频信号,进行阈值量化处理时候需要确定分解得到的各层系数的阈值。从高频信息中提取有用信号需要恰当选择阈值范围。特别要谨慎防止在处理噪声过程中把弱小的有用信号当成噪声去除了。通常情况下设置阈值 λ 为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2\lg(n)} \quad (12)$$

对于式(12), n 是分解层数中高频系数的个数,未知标准偏差 σ 表示实际噪声系数。对各层小波分解后的高频系数 $d_{j,k}$ 可以应用下式求出:

$$\eta_{\lambda}(d) = \begin{cases} \text{sgn}(d)(|d| - \lambda), & |d| \geq \lambda \\ 0, & |d| < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

利用小波技术进行阈值的量化处理过程中,通过设置小于阈值 λ 的系数等于 0,系数大于或等于阈值 λ 的均减去 λ 就可以集中于高频系数的噪声消除。还可以用硬阈值处理办法处理高频系数 $d_{j,k}$,即完全保留下来大于阈值的高频系数而不再舍去^[12]。

(3) 小波重构过程。依据小波分解的第 J 层的低频系数以及从第 I 层至第 J 层的高频系数来进行信号重构,便得到去除噪声的观测数据序列的估计值。

对原始信号进行小波分析处理时,应根据原始信号的实际情况适当确定小波分解的层次。因为对原始信号进行小波分析时,如果对采样点较稀的数据进行过高频率的小波分解,会使原始信号在恢复时失真。进行一般的小波分析时,进行三层或四层分解就可达到理想效果。

3 实例分析

3.1 工程概况

某市一邮政大楼基坑,位置地势平坦,南北长

70 m,东西长 48 m,坑深约 8 m,西侧路面下部埋设有市政管线,东部距民用高层约 5 m,南部距合作社办公楼 7 m。综合判定该工程为一级基坑^[13-14]。在该基坑的南部布置有三个监测点,分别为 NW1、NW2、NW3,且三个监测点之间通视。基坑平面位置如图 1 所示。



图 1 基坑平面位置图

3.2 原始监测数据

针对本基坑,采用了全站仪测小角法对其坑周土体共进行了 15 周期的监测,各周期之间间隔时间为 5 d。首次测量数据作第 1 周期,其后各周期监测值与首次监测数据比较得出各周期的位移变化量。由于 NW3 测点靠近材料运输通道,人为因素影响较严重。故文中采用 NW1、NW2 两测点作为实验数据,原始数据见表 1。

表 1 原始监测数据

单位:mm

周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
NW1	0.0	0.2	0.2	1.4	0.9	1.3	0.7	1.0	1.2	1.4	1.3	0.9	1.0	0.9	0.8
NW2	0.0	0.1	0.4	1.2	2.3	3.3	2.8	3.1	3.0	2.2	2.8	2.9	2.7	2.5	2.3

3.3 Verhulst 模型与 GM(1,1)模型坑周土体水平位移量预测结果

以 NW1 监测点水平位移量预测为例.调用函数 $YC = VER(X, N)$ 即可得到预测结果。 YC 为返回的预测向量, $VER(X, N)$ 为编制的灰色 Verhulst 函数模型。 X 为已知监测数据向量, N 为预测周期数, NW2 监测点计算方法与之相同,同理编制函数 $YC = GMYC(X, N)$, X, N 同 $VER(X, N)$ 中 X, N , 利用 MATLAB 软件计算可得 GM(1,1)模型的水平位移量预测结果。

NW1、NW2 水平位移量预测结果见表 2、表 3。表中结果表示两种模型分别利用前 12 周期数据来预测第 13 周期的位移量,利用前 13 周期数据来预测第 14 周期的位移量,利用前 14 周期的数据来预

测第 15 周期的位移量。

表 2 GM(1,1)模型预测结果

单位:mm

点号	预测值		
	13 周期	14 周期	15 周期
NW1	1.296	1.299	1.151
NW2	3.451	3.966	3.208

表 3 Verhulst 模型预测结果

单位:mm

点号	预测值		
	13 周期	14 周期	15 周期
NW1	1.168	1.162	1.143
NW2	2.969	2.899	2.862

3.4 模型精度检验

记原始变形序列与相应模型计算序列之差

$\epsilon^{(0)}(k)$ 为残差: $\epsilon^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$;

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$ 为原始数列均值,

$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2$ 为原始序列方差,

$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon(k)$, $s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\epsilon(k) - \bar{\epsilon})^2$ 分别为残差

均值和残差方差, $c = \frac{s_2^2}{s_1^2}$ 为均方差比值,

$p = P(|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745s_1)$ 为小误差概率, 则精度等级及对应指标参照表 4。

表 4 精度等级及对应指标^[15]

模型精度等级	c	p
I 级	$c \leq 0.35$	$0.95 \leq p$
II 级	$0.35 < c \leq 0.50$	$0.80 \leq p < 0.95$
III 级	$0.50 < c \leq 0.65$	$0.70 \leq p < 0.80$
IV 级	$0.65 < c$	$p < 0.70$

经计算得到降噪前两种模型精度检验指标, 见表 5。

表 5 降噪前模型精度检验

点号	c		p	
	GM(1,1)模型	Verhulst模型	GM(1,1)模型	Verhulst模型
NW1	0.771	0.082	1	1
NW2	0.669	0.348	1	1

从表 5 可知: GM(1,1)模型的预测结果并不理想, 均方差比值均在 IV 级精度, 小误差概率在 I 级精度, 而 Verhulst 模型均方差和小误差概率均在 I 级精度, Verhulst 模型的预测效果明显好于传统 GM(1,1)模型。

3.5 加入小波降噪

待分析信号的复杂性和各小波函数特性的差异导致不同小波函数处理分析的效果也会有出入。但是存在某一个特定的小波函数对信号有最佳的分析效果。本文运用 MATLAB 软件拟从 haar 小波对实际监测值进行降噪处理, 后利用降噪数据进行深基坑坑周土体下周期水平位移量预测。

将各个监测点实际监测数据的前 N (N 取 12, 13, 14) 周期输入系统作为离散的信号, 采用 haar 小波进行软阈值降噪处理, 采取三层分解后重构的方法, 其他参数采取系统默认值。NW1, NW2 降噪前

后所得预测结果见表 6、表 7。

表 6 NW1 预测结果对比分析 单位: mm

周期	实测值	GM(1,1)方法预测值		Verhulst 方法预测值	
		降噪前	降噪后	降噪前	降噪后
13	1.0	1.296	1.041	1.168	1.079
14	0.9	1.299	1.219	1.162	1.108
15	0.8	1.151	1.092	1.143	1.041

表 7 NW2 预测结果对比分析 单位: mm

周期	实测值	GM(1,1)方法预测值		Verhulst 方法预测值	
		降噪前	降噪后	降噪前	降噪后
13	2.7	3.451	3.279	2.969	2.808
14	2.5	3.966	3.131	2.899	2.771
15	2.3	3.208	3.092	2.862	2.709

计算得到降噪后两种模型的精度检验指标, 见表 8。

表 8 降噪后模型精度等级检验

点号	c		p	
	GM(1,1)模型	Verhulst模型	GM(1,1)模型	Verhulst模型
NW1	0.269	0.066	1	1
NW2	0.391	0.267	1	1

结果分析:

(1) 降噪前 GM(1,1)模型的预测结果相对于真实监测数据均有较大的偏离, 而 Verhulst 模型的预测结果相对于真实值的偏离程度较小。

(2) 降噪后 GM(1,1)模型对 NW1 进行预测时, 出现了 $c = 0.269$ 的情况, 为 I 级精度, 可以用来预测, 预测结果可靠; GM(1,1)模型对 NW2 进行预测时, 出现了 $c = 0.391$ 的情况, 为 II 级精度, 预测结果较为可靠; Verhulst 模型对 NW1、NW2 进行预测时, 出现了全部 $c < 0.35$ 的情况, 为 I 级精度, 可以用来预测, 预测结果最为可靠。

(3) 与降噪前相比 GM(1,1)模型精度等级大大提高, Verhulst 模型预测等级精度仍为 I 级, 但是均方差比值明显变小, 说明预测结果的离散型变得更小, 比降噪前预测有很大改善。

4 结 语

(1) Verhulst 模型在坑周土体水平位移预测中均达到一级精度, 可以用来预测。而传统 GM(1,1)预测结果不理想, 有待进一步研究。

(2) 小波降噪后 Verhulst 模型预测仍为一级精

度,但均方差比值明显减小,说明小波降噪起到了较好的效果。

(3) 小波 Verhulst 模型在深基坑坑周土体的水平位移量预测方面体现了很好的优越性,根据模型预测结果的对比分析,可以及时掌握深基坑坑周土体的稳定情况,以便于提前采取相应措施,保证深基坑的安全施工。

参考文献:

[1] 张庆伟,肖建清. GM(1,1)与 Verhulst 模型在地基沉降预测中的适用性比较[J]. 沈阳工业大学报,2014(11): 716-720.

[2] 高良博,唐诗华,贾伟. 基于 GM(1,1)模型与灰色 Verhulst 模型的地铁竖井沉降预测[J]. 城市勘测,2012(4):132-135.

[3] 赵小雅. 石膏矿采空区顶板下沉量的灰色 Verhulst 预测[J]. 烟台大学学报,2013,26(1):66-68.

[4] 赵福洪,罗志清,杨建文,等. 七种数学模型在沉降预测中的优缺点比较分析[J]. 测绘工程,2014(3):59-62.

[5] 陈正威,王铁生,冯康,等. Verhulst 模型在深基坑坑周土体水平位移预测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版,2014(1):42-45.

[6] 陈建宏,郑海力,施飞. 改进 Verhulst 模型与灰色效果测度的软岩巷道顶板破坏规律分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011(9):2790-2796.

[7] 周德强,冯建中. 建筑物沉降预测的改进 Verhulst 模型研究[J]. 地下空间与工程学报,2011(2):194-198.

[8] 刘法贵,张愿章. 灰色数学及其应用[M]. 开封:河南大学出版社,2002.

[9] Xu K, Wang X, Li Y. Fundamental wave extraction and frequency measurement based on IIR wavelet filter banks[J]. Measurement, 2007,40(6):665-671.

[10] 王中元,周天强,张鹏飞. 高层建筑 GPS 动态变形监测数据处理[J]. 测绘科学,2012(1):47-50.

[11] 宋玲珍. 基于小波变换的自适应图像去噪算法[D]. 开封:河南大学,2006.

[12] 张吉先,钟秋海,戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):118-122.

[13] 赵锡宏,李蓓. 大型超深基坑工程实践与理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[14] 林鸣,徐伟. 深基坑工程信息化施工技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

[15] 程鹏里. GPS 变形监测技术及其预报模型的建立与应用[D]. 郑州:华北水利水电大学,2013.

(上接第 160 页)

[9] Pedersen P T, Jensen J J. Upheaval creep of buried heated pipelines with initial imperfections[J]. Marine Structures, 1988,1:11-22.

[10] 刘君,胡宏. 砂土地基中条形锚板抗拔模型试验的颗粒流数值模拟[C]//2012 颗粒材料计算力学会议论文集. 湖南,2012.

[11] Liu J, Hu H, Yu L. Experimental study on the pull-out performance of strip plate anchors in sand[C]//23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2013.

[12] 刘君,胡宏. 砂土地基锚板基础抗拔承载力 PFC 数值分析[J]. 计算力学学报,2013,30(5):678-682.

[13] Long Yu, Hui Zhang, Jun Liu. A discrete element study on upheaval ratcheting behavior of pipelines buried in sand [C]//ISFOG, 2015.

[14] 刘润,李彪,王洪播,等. 砂土中埋设管线竖直向上运动时土抗力研究[J]. 岩土力学,2011,32(S1):28-32.

[15] Wang J. Monotonic and cyclic uplift resistance of buried pipelines in cohesionless soils[D]. London: University of Cambridge, 2012.

[16] Det Norske Veritas, DNV - RP - F110 (2007). Global buckling of submarine pipelines — structural design due to high temperature/high pressure[S]. Norway, 2007.

[17] Nielsen N R, Lyngberg B. & Pedersen P T. Upheaval buckling failures of insulated buried pipelines: a case story[C]// Offshore Technology Conference. Houston, Texas, U.S.A. 1990.

[18] Byrne B W, et al. Experimental modeling of the unburial behavior of pipeline[C]//Offshore Technology Conference. Texas, USA, 2008.