

文章编号: 0258-0926(2018)03-0056-06; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0056

核岛地基沉降去噪方法及预测技术

王明毓¹, 孙浩¹, 刘锐²

1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518057; 2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 在核电厂的核岛厂房建设过程中会对其地基变形进行观测直至建设完成。由于地址条件不同, 电站核岛厂房筏基完成后的地基变形值不相同, 对跨厂房的物项的影响也不相同。本文选取某核电厂地基沉降 15 期观测数据进行分析。首先通过小波阈值去噪法对沉降数据进行处理, 预处理结果表明, 沉降值和观测时间呈高相关性, 结合地基沉降速率的判断, 地基沉降已经趋于平稳。在此基础上, 本文使用双曲线法和灰色理论法对地基沉降进行了 3 期的短期预测和 30 a 的长期预测。分析结果表明, 短期预测中 2 种预测方法与实际测量结果相比均较为保守, 其中灰色理论法最为保守; 长期预测中, 灰色理论法结果发散, 不适合进行长期预测; 双曲线法的预测结果与欧洲在运 30 a 左右的两个核电站的实际沉降数据较为符合, 预测结果较好。

关键词: 小波去噪; 地基沉降; 双曲线法; 灰色理论法;

中图分类号: TL375 文献标志码: A

Denoising Method and Prediction Technology of Nuclear Island Foundation Settlement

Wang Mingyu¹, Sun Hao¹, Liu Rui²

1. China Nuclear Power Design Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518057, China
2. Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing, 100082, China

Abstract: The foundation deformation of nuclear power plant nuclear island is observed during the whole construction process. Different sites are with different values of foundation deformation that are with different effects on the items crossing buildings at the completion of the raft foundation of the nuclear island. In this paper, the data from 15 times of observation of the foundation settlement in a nuclear power plant are analyzed. Firstly, the observation data is disposed by the wavelet denoising technology. The pretreatment result shows that the foundation settlement is highly time dependent and tends to steady according to the foundation settlement velocity. Based on the above, a 3 times short-term prospect and a 30 years long-term prospect are predicted with hyperbolic method and gray theory method. In short-term prospect aspect, two methods, especially the gray theory method, are both conservative comparing with the actual observation result. As for the long-term prospect, the gray theory method is inapplicability for its result diverges. While the prospect with hyperbolic method is effective comparing with the foundation settlement data of two typical nuclear power plants which have operated for 30 years.

Key words: Wavelet denoising, Foundation settlement, Hyperbolic method, Gray theory method

0 引言

在核电厂的核岛厂房建设过程中会对其地基变形进行观测直至建设完成, 如果各厂房之间的

沉降差过大会导致跨越厂房的工艺管道、钢连廊、通风管等系统设备变形, 甚至破坏。

从上世纪开始, 地基沉降预测和计算方面的

收稿日期: 2017-05-06; 修回日期: 2017-08-20

作者简介: 王明毓(1983—), 男, 高级工程师, 现从事核岛力学分析工作

理论不断得到改进和创新,在道路工程、民用建筑工程领域积累了大量经验。但在核电厂沉降预测领域,由于目前国内核电站选址都在微风化的基岩上,核电厂的地基沉降量较小,不同厂房地基间的沉降差值一般都小于4~5 mm的设计值,核电厂地基沉降的数据处理和预测技术一直没有得到关注。

随着我国核电机组陆续建设,实际建造过程中各电厂观测的地基沉降差值和速率各不相同。这就需要对实测的沉降数据进行分析,确认沉降开始趋于平稳的时间,并对最终沉降差进行预估。

本文对某核电厂的地基沉降数据进行去噪预处理,并选取工程中常用的方法进行预测计算,结合国外运行时间30 a左右的核电厂核岛厂房沉降数据,提出核电厂地基沉降预测计算的合适方法。

1 监测数据

某核电厂岩性包括砂岩、泥质粉砂岩和泥页岩。自土建施工开始,按照参考电站及同类型电站的做法,在核岛厂房筏基完成后便进行地基变形的观测,对比同类型电站的观测数据,该核电厂的变形值较大,部分厂房间的变形差超出了设计值的范围。

本文对2号核岛厂房具有代表性的监测位置数据进行分析,变形监测按每3个月监测一次的周期进行,各厂房筏基浇注完成后进行初次监测。2RX(反应堆厂房)和2KX(燃料厂房)前15次监测的数据如图1所示。

从变形监测数据和曲线来看,变形主要是在建造期间发生的,地基变形最大的阶段主要处于

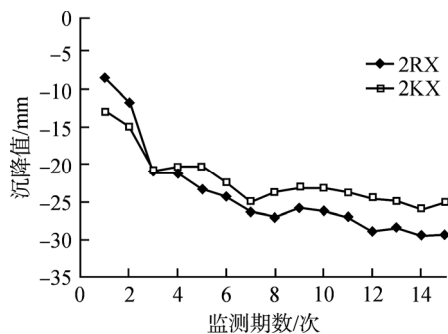


图1 2RX与2KX厂房沉降数据

Fig. 1 Settlement Data of 2RX And 2KX

土建高峰期,随着主体土建工程的逐步结束,地基变形逐步趋于稳定。

2 小波阈值去噪方法

由于受到主客观因素影响,几乎所有沉降观测资料中都存在不同程度的系统误差和偶然误差。如图1所示,随着核电厂的施工开展,地基沉降量理论上应该逐渐增大,但是实际测量结果会出现当期测量结果小于上一期测量结果的情况,所以观测误差是不可避免的。在对观测数据进行处理之前要先对数据中的误差进行处理,将误差消除或减弱。

小波分析是上世纪八十年代发展起来的新型学科,是傅里叶变换的发展和突破,目前应用非常广泛。本文采用小波去噪方法降低沉降数据误差的影响。

2.1 小波阈值去噪的原理

阈值去噪的原理是小波分解后的各层系数中作用某阈值 T ,对模大于或小于某阈值 T 的系数分别处理,然后再用处理过的系数去重构得到去噪后的信号^[1-2]。设信号 $f(t)$ 被噪声污染后为 $w(t)$,那么观测信号可以表示为:

$$w(t) = f(t) + \sigma e(t) \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中, $e(t)$ 为噪声; σ 为噪声强度。对 $f(t)$ 进行离散采样,得到 n 点离散信号 $f(n)$, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$,其小波变换为:

$$w_f(m, b) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \psi(2^{-m} - b) \quad m, b \in Z \quad (2)$$

式中, $w_f(m, b)$ 为小波变换后的系数。

2.2 软阈值法对数据的处理

1995年Donoho D.L和Johnstone教授在小波变换的基础上提出了阈值去噪的方法。他们先后提出了硬阈值、软阈值^[3-4]和几乎硬阈值^[5]等阈值处理函数。万永福、袁震东^[5]分析了各种传统的阈值处理方法,提出了一个一般化的带有参数 λ 阈值策略分数幂模型,它的定义如下:

软阈值函数:

$$\hat{w}_{m,b} = \begin{cases} \text{sign}(w_{m,b}) \cdot (|w_{m,b}| - \lambda) & |w_{m,b}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{m,b}| < \lambda \end{cases}$$

(3)

式中, $w_{m,b}$ 为小波系数; $\hat{w}_{m,b}$ 为估计小波系数;

λ 为阈值。

式(3)的含义就是把信号分解后得到的小波系数的绝对值和给定的阈值进行比较,但是与硬阈值函数处理系数的策略不同。它的策略是小于给定阈值的变为0,大于阈值的系数变为该系数与阈值的差值,并保持符号不变。

2.3 核岛沉降监测数据的去噪处理和分析

本文采用 Matlab 数据分析软件自带的小波分析工具箱,对 2RX 与 2KX 的原始沉降观测数据进行去噪处理。根据数据特点,本次除噪分析选用具有紧支集正交小波基的 Daubechies 小波,采用 8 系数函数 db8 进行数据除噪,如图 2、图 3 所示。

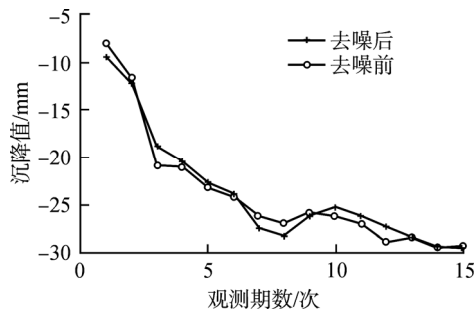


图 2 2RX 去噪前后沉降值

Fig. 2 Original Data vs Denoising Data of 2RX Settlement

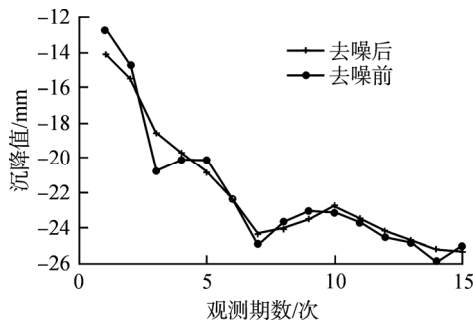


图 3 2KX 去噪前后沉降值

Fig. 3 Original Data vs Denoising Data of 2KX Settlement

目前核电领域对地基沉降是否稳定的判断没有相关的规范,按照 JGJ 8-2007《建筑变形测量规范》^[6],建筑物最后 100 d 沉降量速率小于 0.01~0.04 mm/d 可认为进入稳定阶段;在高速铁路基、桥涵工程沉降趋于稳定的一个重要指标^[7]是时间和沉降量的相关系数要大于 0.92。

本文使用小波去噪的方法,得到去噪前后的沉降值和时间的相关系数,如表 1 所示,数据处理前相关系数在 0.92~0.93 之间,经过去噪处理后

表 1 去噪前后获取的相关系数的比较

Table 1 Correlation of Original Data vs Denoising Data

数据	2RX 相关系数	2KX 相关系数
去噪前	0.934	0.923
去噪后	0.940	0.954

相关系数提高到 0.94 以上。

3 地基沉降预测

目前用于沉降预测的方法主要有:灰色理论法、双曲线法、三点法、星野法等。本节对去噪后的沉降数据,采用常用的双曲线法和灰色理论法进行沉降预测分析。

3.1 双曲线法预测

双曲线法是一种依据地基实测沉降数据的静态沉降预测方法。这种方法是在恒载阶段选取拐点进行线性拟合分析。采用含有待定参数的公式^[8-9]可以进行最终沉降和沉降发展趋势的预测。

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (4)$$

由式(4)可得出:

$$\frac{t - t_0}{(S_t - S_0)} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (5)$$

式中 S_t 为 t 时间的沉降量值; t_0 为数据初始时间; S_0 为与 t_0 对应时间的沉降量。由式(5)可以得出直线关系曲线,选取预测系数 α 和 β 。

应用双曲线法对去噪后的数据进行预测分析,如图 4 所示。

2RX 应用双曲线法得到的 α, β 分别为 29.205 和 0.0228, 2KX 应用双曲线法得到的 α, β 分别为 64.342 和 0.0278。

3.2 GM(1, 1)灰色理论法预测

灰色理论是我国的邓聚龙教授 1982 年首创,

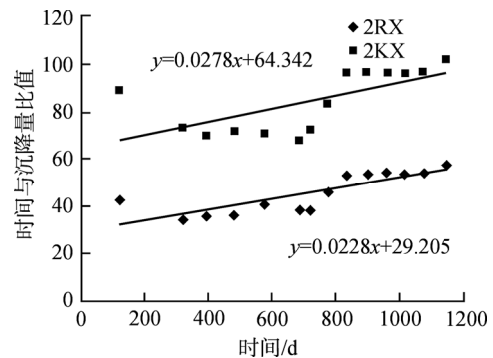


图 4 双曲线法

Fig. 4 Hyperbola Method

是一种动态预测模型^[10-11]。沉降预测中采用最多的是 GM(1, 1)模型，它是一种模糊的动态模型。由于受到施工环境和检测条件的影响，有些工程不能观测到足够多的地基沉降数据，灰色理论则很好地解决了这个问题。GM(1,1)灰色模型的预测方法主要的计算过程如下所示。

沉降数据序列 $X^{(0)}$ 为：

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (6)$$

式中， $x^{(0)}(k) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n$ 。

累加生成新序列 $X^{(1)}$ ：

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (7)$$

式中， $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \geq 0$ 。

$X^{(1)}$ 的紧相邻值生成序列 $Z^{(1)}$ ：

$$Z^{(1)} = [z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)] \quad (8)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) ;$$

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (9)$$

式(9)即为 GM(1,1)模型。参数 a 、 b 可通过建立微分方程求解， a 为发展灰数， b 为内生控制灰数， $\hat{a} = (a, b)^T$ 是参数列。同时：

$$\left\{ \begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \\ Y &= \begin{bmatrix} -x^{(1)}(2) \\ -x^{(1)}(3) \\ \dots \\ -x^{(1)}(n) \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

求微分方程 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘估计系数列。满足 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 则可得微分方程的响应函数为：

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \left\{ \hat{x}^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right\} e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (11)$$

$$x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$$

得出还原函数：

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (12)$$

建模计算后要对计算结果进行精度检验，残

差定义为：

$$q^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (13)$$

残差方差为：

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [q^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)}(k)]^2 \quad (14)$$

$$\bar{\varepsilon}^{(0)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |q^{(0)}(k)|$$

实测数据方差：

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(n) - \bar{X}^{(0)}]^2 \quad (15)$$

$$\bar{X}^{(0)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(n)$$

残差特征检验计算指标为：

$$C = \frac{s_1}{s_2} \quad (16)$$

$$P = P \left\{ \left| q^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)} \right| \leq 0.6745s_2 \right\} \quad (17)$$

以上的2个指标按下表2评价计算精度等级，若 P 、 C 都在精度范围之间，可用 GM(1, 1)计算，否则，需要对残差进一步处理，进行残差校正。

表2 灰色模型精度评价标准表
Table 2 Standard Table of Grey Model Accuracy Evaluation

计算指标	预测精度			
	高	合格	勉强	不合格
P	>0.95	0.8-0.95	0.7-0.8	<0.7
C	<0.35	0.35-0.5	0.5-0.65	>0.65

2RX 应用 GM(1,1)灰色理论法得到的 P 、 C 分别为 1 和 0.1857，预测曲线见图 5。2KX 应用 GM(1, 1)灰色理论法得到的 P 、 C 分别为 1 和 0.1709，预测曲线见图 6。2RX 和 2KX 的地基沉降数据预测

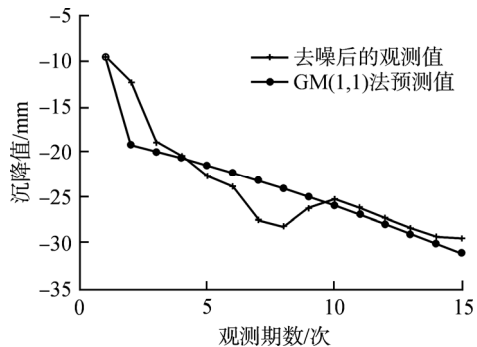


图5 2RX 厂房预测数据
Fig. 5 Forecast Data of 2RX Building

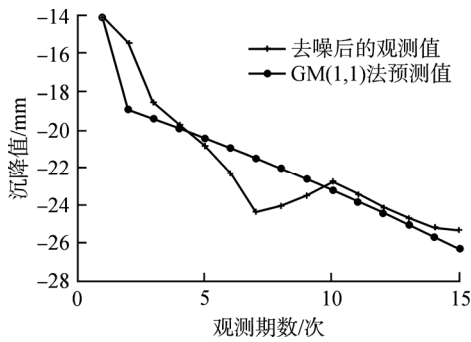


图6 2KX 厂房预测数据
Fig. 6 Forecast Data of 2KX Building

精度评价等级为高精度。

3.3 预测结果比较

3.3.1 短期预测 本文使用 2 种方法对地基沉降接下来的 3 期进行了预测，并将预测结果和实际测量结果进行比较，如图 7、图 8 所示。短期预测的结果表明，2 种方法对于沉降差的预测都较为保守，GM(1,1)灰色理论对沉降差的预测值大于双曲线法预测，即 GM(1,1)灰色理论法相对于双曲线法更为保守。

3.3.2 长期预测 使用 2 种方法对核电站寿期 60a 的沉降的长期效应进行了进一步预测，其中 GM(1, 1)方法预测的结果发散得很厉害，达到数

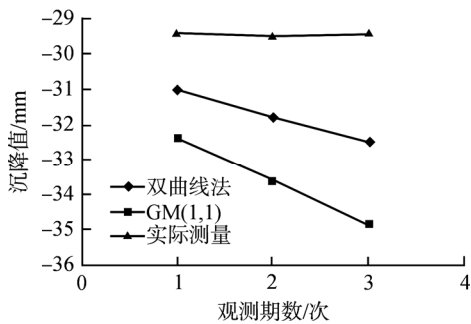


图7 RX 厂房短期预测数据
Fig. 7 Short Time Forecast Data of RX Building

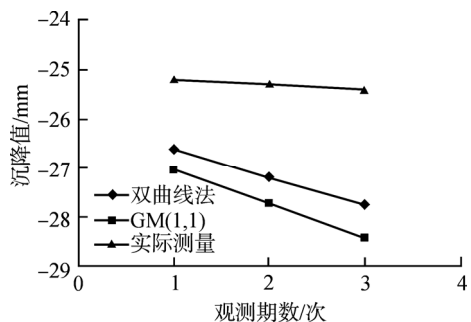


图8 KX 厂房短期预测数据
Fig. 8 Short Time Forecast Data of KX Building

米，此方法不适合进行长期的地基沉降数据预测。双曲线的预测结果如图 9 所示。

对双曲线法的预测结果，本文将其与欧洲运行 30 a 左右的典型核电站的核岛厂房地基沉降结果进行比较（表 3）。本文研究的电站的地基岩性情况介于如下电厂 1 和电厂 2 之间，双曲线方法预测的沉降情况也介于两者之间，与实际情况较为符合。

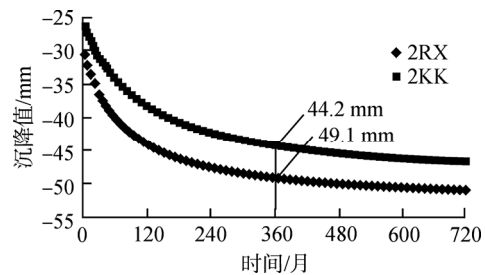


图9 长期预测数据
Fig. 9 Long Time Forecast Data

表3 欧洲核电厂核岛沉降情况
Table 3 Settlement Data of Two European Nuclear Power Plants

电厂	核岛厂房地基岩性	沉降值/mm	运行时间/a (截止 2016 年)
电厂 1 (900 MW)	石灰岩	1 号核岛: 18	34
		2 号核岛: 17	33
		3 号核岛: 28	30
		4 号核岛: 23	29
电厂 2 (900 MW)	沙、砾石及混合体在白垩层上	1 号核岛: 55	26
		2 号核岛: 55	26
		3 号核岛: 80	25
		4 号核岛: 70	25

岩石力学研究及工程实践显示，半无限体地基上承受竖向载荷岩体的力学响应及时效变形行为与边坡和地下洞室有着本质的不同，即加载完成后岩体的变形将随着时间的增长逐步趋于收敛；而且，岩体内部结构的改变总体上是使卸荷后岩体的力学特性向增强的方向转化，地基岩体的时效变形必然表现为衰减型蠕变特征。

4 结论

通过小波去噪法对沉降数据进行处理，经过去噪处理，2RX 和 2KK 地基沉降值与时间的相关系数均提高到 0.94 以上，综合沉降速率的判断，核岛厂房沉降趋于稳定。

使用双曲线法和 GM(1, 1)灰色理论法对厂房短期的地基沉降进行预测。2 种方法的短期预测沉降值均大于实际测量值, 即预测结果均是保守的, GM(1, 1)灰色理论法较双曲线法更为保守。

长期地基沉降预测中, GM(1, 1)灰色理论法结果发散, 此方法不适合地基沉降的长期预测。双曲线法对地基沉降的预测结果较好, 本文将此方法对厂房 30 a 后的预测结果与欧洲两处已经运行 30 a 左右电站进行比较, 本电站地基的岩性介于 2 处欧洲电站厂地基岩性之间, 预测结果也介于两者实际观测沉降结果之间, 预测结果较好。

参考文献:

- [1] 王新, 朱高中. 一种新型小波阈值法在信号消噪中的应用研究[J]. 高压电技术, 2008, 34(2): 342-345.
- [2] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 64-108.
- [3] 王红燕, 邵玉愧, 张海等. 基于小波阈值方法的电能质量扰动去噪分析[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(2): 185-187.
- [4] 赵瑞珍, 胡占义, 胡绍海. 天体光谱信号去噪的小波域复合阈值新算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(8): 1644-1647.
- [5] 万福永, 袁震东. 小波收缩策略的广义分数幂模型[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2001, 8(3): 164-167.
- [6] JGJ 8 建筑变形测量规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [7] 王建敏, 周鹏, 王旭. 小波阈值去噪发在高铁沉降观测数据处理中的应用研究[J]. 矿山测量, 2011, 3: 69-71.
- [8] 刘贵君. 双曲线法在预测软土地基最终沉降量中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2009, 11: 30-33.
- [9] 赵俊明. 非典型软质土沉降与固结特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [10] 李磊. 地基沉降预测方法分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [11] 孟德光, 岳祖润, 李敬平. 灰色模型在软土地基沉降预测中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2004, (4): 51-54.

(责任编辑: 张祚豪)