

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0811-05

考虑气象因素影响的大坝监测沉降小波分析

张琦伟¹, 袁鸿鹄², 王芝银², 朱鸿雪², 宫晓明¹

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044; 2. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249)

摘要: 为了消除大坝沉降监测数据受温度、湿度及光照等气象因素及外界不确定因素的噪声响应, 提出考虑气象因素影响的大坝监测沉降小波分析方法。首先建立原始监测数据与各气象因素的函数关系, 进而消去气象因素对坝体沉降的影响, 然后采用小波分析对监测数据进行去噪处理, 最后得到大坝真实的荷载响应沉降曲线, 为大坝稳定性评价提供依据。实例应用表明, 考虑气象因素影响的大坝监测沉降小波分析方法能有效地去除气象因素及外界不确定因素引起的噪声响应, 比小波直接去噪法效果更佳, 与数值模拟计算值能较好地吻合, 具有更好的实际应用价值。

关键词: 大坝监测沉降; 小波分析; 气象因素; 去噪处理

中图分类号: TU 459

文献标识码: A

Wavelet analysis of monitoring dam settlement considering effects of meteorological factors

ZHANG Qi-wei¹, YUAN Hong-hu², WANG Zhi-yin², ZHU Hong-xue², GONG Xiao-ming¹

(1. Beijing Municipal Institute of Hydraulic Engineering Planning Design and Research, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The monitoring data of dam settlement are usually disturbed by uncertain factors and meteorological factors such as temperature, air humidity and light intensity. In order to remove those factors, a new method of wavelet analysis considering the effects of meteorological factors for dam settlement is proposed. Firstly, the functional relation between the monitoring data and the meteorological factors is established. And then based on the functional relation, the effects of meteorological factors on the monitoring data of dam settlement can be removed. Finally, based on the de-noising process of monitoring data by wavelet analysis, a dam settlement curve that is close to the practical situation can be obtained, which can provide dam stability evaluation with scientific basis. The results show that the new method of wavelet analysis considering the effects of meteorological factors is better than the method of direct wavelet analysis; and it can effectively remove noise signal caused by meteorological factors and other uncertain factors; and the dam settlement processed in this method agrees well with the numerical simulation results; and it has better feasibility and practical application value.

Key words: dam settlement monitoring; wavelet analysis; meteorological factors; de-noising processing

1 引言

现场大坝沉降的监测数据经常受外界多种客观条件的影响, 如荷载条件、测量仪器、测量人员等, 由于测量仪器对气象因素比较敏感, 导致监测数据还受温度、湿度、光照等气象因素的干扰, 因而在监测沉降曲线中存在许多数据异常变化的现象。大坝监测数据序列可视为一数字信号序列, 它由不同的频率成分组成。其中, 包括随气象因素(湿度、气温和光照等)而变化的部分, 有相应气象因素所具有

的较为明显的特征; 受到荷载因素影响随时间持续而出现的趋势性变化部分, 一般表现为低频率、长周期性; 受到随机因素及观测误差影响的噪声部分, 通常表现为高频率、短周期性; 另外还包含有严重偏离目标真值的测值。小波分析由于能消除外界不确定因素引起的干扰, 已广泛地应用于岩石试验数据消噪^[1-2]、边坡监测数据处理^[3-4]、地基沉降监测数据分析^[5-6]、深基坑变形预测^[7]及岩爆预测分析^[8]中。目前, 国内学者对大坝监测数据也进行了小波消噪分析, 聂学军^[9]将大坝安全监测的数据系列视

收稿日期: 2009-07-21

第一作者简介: 张琦伟, 男, 1964年生, 博士, 地质所所长, 主要从事水利水电工程地质方面的科研工作。E-mail: zqw2002@126.com

为由不同频率成分组成的数字信号序列, 结合小波分析理论, 对监测数据进行分析处理; 陈继光^[10]利用小波分析消除了大坝时间序列观测数据的测量误差。文献[1~10]均注重外界随机误差及观测误差的消除, 在受气象因素影响较小的数据分析中取得了较好的效果, 而与大坝监测沉降密切相关的气象因素, 诸如温度、湿度、光照强度等方面消噪分析的研究还比较少。

为此, 本文以第 29 届奥林匹克运动会铁人三项比赛场地十三陵水库大坝在赛前、赛期和赛后的变形监测数据为依据, 根据实际现场监测变形期间的对应温度、湿度和光照的实测序列值, 对大坝监测沉降进行考虑气象因素影响的小波消噪分析。

2 考虑气象因素影响的坝体沉降小波消噪方法

考虑气象因素影响的坝体沉降小波分析方法, 首先建立原始监测数据与各气象因素的函数关系, 进而消去气象因素对坝体沉降的影响, 然后采用小波分析对监测数据进行去噪处理, 最后得到坝体真实的沉降曲线。

根据坝体沉降监测的工作状态, 坝体沉降监测数据受温度、湿度及光照等气象因素及外界不确定因素的干扰可合理分解成 5 部分, 即

$$f = f_s + f_w + f_g + f_h + \sigma \quad (1)$$

式中: f 为坝体沉降监测数据; f_s 为湿度分量; f_w 为温度分量; f_g 为光照分量; f_h 为荷载分量; σ 为噪声分量。

为了获取坝体由于外加荷载引起的坝体沉降荷载分量, 考虑温度与湿度因素总是同时存在且相互作用, 分别建立温度 f_s 分量及湿度分量 f_w 比较困难, 则式(1)可改写为

$$f = f_{sw} + f_g + f_h + \sigma \quad (2)$$

式中: f_{sw} 为温度与湿度的共同响应分量。

由式(2)可知, 在没有光照及外荷载作用的条件下进行现场监测, 光照分量 f_g 、荷载分量 f_h 均为 0, 监测数据 f 只受温度、湿度的影响, 利用监测数据 f 建立与温度、湿度的函数关系, 即得到温度、湿度响应分量 f_{sw} ; 而对于有光照、没有外荷载作用的条件下进行现场监测, 荷载分量 $f_h=0$, 监测数据 f 同时受温度、湿度、光照的影响, 监测数据 f 减去温度、湿度响应分量 f_{sw} , 即得到光照分量 f_g 。

于是, 对同时有温度、湿度、光照、外荷载条

件下的监测数据进行考虑气象因素影响的坝体沉降小波分析方法的具体步骤是:

(1) 利用已建的温湿响应分量 f_{sw} , 在监测数据中消除温湿影响, 得到消除温湿影响的大坝沉降 f_1 , 即

$$f_1 = f - f_{sw} = f_g + f_h + \sigma \quad (3)$$

(2) 利用已建的光照响应分量 f_g , 在监测数据中消除光强影响, 得到消除气象因素(湿度、温度及光照)影响的大坝沉降 f_2 , 即

$$f_2 = f - f_{sw} - f_g = f_h + \sigma \quad (4)$$

(3) 对式(4)做小波消噪处理, 将消除气象因素影响后的监测变形信号分解成一系列小波函数的迭加, 而这些小波函数都是由基本小波函数经过平移与尺度伸缩得到, 它在数学形式上表现为基本小波函数 $\psi(t)$ 位移 τ 后, 再在不同尺度 a 下与待分析的信号 $x(t)$ 的内积。

设 $\psi(t) \in L^2(R)x(t)$, 其 Fourier 变换为 $\psi(\omega)$, 当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件:

$$W_{Tx}(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (5)$$

等效的频域表达式为:

$$W_{Tx}(a, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\omega) \psi(a\omega) e^{+ja\omega\tau} d\omega \quad (6)$$

式中: a 为伸缩因子; τ 为平移因子; $\psi(\omega)$ 、 $x(\omega)$ 分别为 $\psi(t)$ 、 $x(t)$ 的傅立叶变换; $W_{Tx}(a, \tau)$ 为 $x(t)$ 的小波变换系数, 它表示信号 $x(t)$ 在位置 τ 处, 时间段 $a\Delta t$ 内的频率分量, 而 Δt 为 $\psi(t)$ 的有效宽度。

根据小波变换的频域表示, 可以将其看成用基本频率为 $\psi(\omega)$ 的带通滤波器在不同尺度 a 下对信号作滤波。滤波后最终得到荷载分量 f_h , 即

$$f - f_{sw} - f_g - \sigma = f_h \quad (7)$$

3 十三陵大坝监测变形的消噪分析

奥运铁人 3 项比赛场地十三陵大坝变形监测包括赛前场地准备期、比赛期及赛后期 3 个阶段的现场实测, 历时 3 个多月, 现场监测变形数据严重受气象因素的影响。因此, 根据上述考虑气象因素影响的坝体沉降小波分析方法, 对现场监测变形数据进行分析处理。

3.1 建立气象因素引起的变形响应函数

为了消除温度、湿度及光照对测量变形数据的

影响,特选择与比赛期间环境和气象条件较接近的9月10日进行了与奥运会期间完全相同时段的现场实测,获得了无荷载条件下大坝坝坡各标点随时间、温度、湿度及光照的变形实测序列值。在进行监测数据的消噪时,根据第2节建立温度湿度响应 f_{sw} 及光强响应 f_g 的方法,首先选取7月15日~10月5日除赛期的测量数据^[11](无光照、无荷载)建立温湿响应分量 f_{sw} 。然后,选取9月10日全天的测量数据(有光照、无荷载),消除温度湿度及光强变化对测量变形的影响。限于篇幅,选取大坝坝坡测点4的竖向位移进行分析。

(1) 温度湿度分量 f_{sw}

基于7月15日~10月5日监测点4的竖向位移^[11],建立温度、湿度响应分量 f_{sw} 为

$$f_{sw} = 5.1808 + 9.5858 \times \left(\frac{T}{T_0} \right) - 13.2325 \times \left(\frac{S}{S_0} \right) - 0.6342 \times \left(\frac{T}{T_0} \right) \left(\frac{S}{S_0} \right) - 3.0298 \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + 3.8273 \times \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (8)$$

式中: f_{sw} 为温度和湿度的变形响应函数; T , S 分别为温度和湿度; T_0 , S_0 分别为温度和湿度的参考值,在此建立响应函数时取 $T_0=15^\circ\text{C}$, $S_0=50\%$ 。

(2) 光强响应分量 f_g

基于9月10日测点4竖向位移的测量数据,通过式(8)消除温度、湿度对变形的影响后,建立光照分量 f_g 为

$$f_g = -18.181G^4 - 254.97G^3 + 170.21G^2 + 34.702G + 2.3374 \quad (9)$$

式中: f_g 为光强的变形响应函数; G 为光强变量。

3.2 奥运期间监测点4竖向位移分析

(1) 8月18日监测点4竖向位移

8月18日为奥运铁人3项第一个比赛日,比赛当天的光照条件与9月10日相近,但温度、湿度存在一些差异,表1给出了8月18日比赛当天的温度、湿度及光照强度。

将表1中温度、湿度带入式(8)可得出温度、湿度响应分量 f_{sw} ,得到消去温度湿度影响的坝体沉降 f_1 (如表2所示);将表1中光照强度代入式(9)可得出光照强度引起的光强响应分量 f_g ,据此得到消去气象因素(湿度、温度及光强)影响的坝体沉降 f_2 (如表2所示);然后,按照第2节所述步骤对大坝监测沉降 f_2 进一步做小波消噪处理,最终得到荷载响应

分量 f_h ,如表2所示,根据所获数据给出的8月18日测点4的竖向位移如图1所示。

表1 8月18日温度湿度及光照强度
Table 1 Temperature, air humidity and light intensity in Aug. 18

时间/h-min	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
温度/ $^\circ\text{C}$	25	27	28	28	30	30	30	29	29	29
湿度/%	80	70	60	60	50	50	48	60	60	60
光强	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5

表2 8月18日测点4的竖向位移
Table 2 Vertical displacements at measuring point No. 4 in Aug. 18

时间/h-min	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
测量值/mm	0.0	2.1	0.4	0.7	1.2	1.2	-3.9	-8.1	-4.5	-2.4
除温湿/mm	0.0	1.7	-0.8	-0.5	-0.9	-0.9	-6.3	-9.1	-5.5	-3.4
除温湿光/mm	-0.3	1.4	-1.0	-0.7	-1.1	-1.1	-5.2	-8.1	-0.1	2.0
小波去噪/mm	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-1.0	-3.0	-5.5	-4.8	0.2	2.5

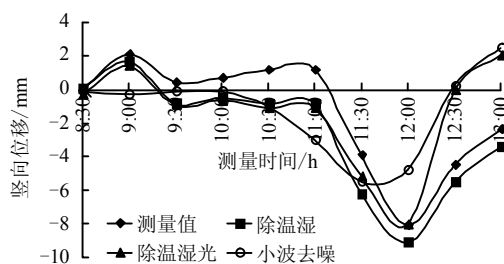


图1 8月18日测点4的竖向位移
Fig.1 Vertical displacements at measuring point No. 4 in Aug. 18

由图1可知,基于考虑气象因素影响的小波分析方法去噪后的坝体沉降与比赛当天的实际观众荷载引起的沉降规律相符,即比赛期间(10:00~12:00)监测点有3~6 mm的沉降,比赛结束后(12:30)监测点变形回弹至零附近,这与观众离开大坝,大坝在无荷载条件下无沉降的变形规律相同。

(2) 8月19日监测点4竖向位移

8月19日为奥运铁人3项第2个比赛日,比赛当天的光照条件与9月10日相近,但温度、湿度存在一些差异,表3给出了8月19日比赛当天的温度、湿度及光照强度。

利用表3实测数据,对数据进行考虑气象因素影响的小波消噪分析,所获结果如表4所示,测点4的竖向位移如图2所示。

表3 8月19日温度湿度及光照强度
Table 3 Temperature, air humidity and light intensity in Aug. 19

时间/h-min	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
温度/℃	25	28	29	30	30	30	28	28	30	29
湿度/%	84	72	64	60	55	60	68	64	62	60
光强	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5

表4 8月19日测点4的竖向位移
Table 4 Vertical displacements at measuring point No. 4 in Aug. 19

时间/h-min	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
测量值	0.0	1.4	2.2	-1.4	-6.1	-4.2	-3.6	0.2	-6.3	-5.3
除温湿	0.2	1.3	1.6	-2.2	-7.5	-5.0	-4.0	-0.6	-6.9	-6.3
除温湿光	-0.1	1.0	1.4	-2.4	-7.7	-5.3	-2.9	0.5	-1.5	-0.9
小波去噪	1.2	0.8	-0.5	-3.0	-5.5	-5.6	-2.1	-0.5	-1.0	-1.4

由图2可知,基于考虑气象因素影响的小波分析方法去噪后的坝体沉降与比赛当天的实际观众动态荷载引起的沉降规律相符,即比赛期间(10:00~11:30)监测点有3~6 mm的沉降,比赛结束后(12:00)监测点变形回弹至0附近,这与观众离开大坝,大坝在无荷载条件下无沉降的变形规律相同。

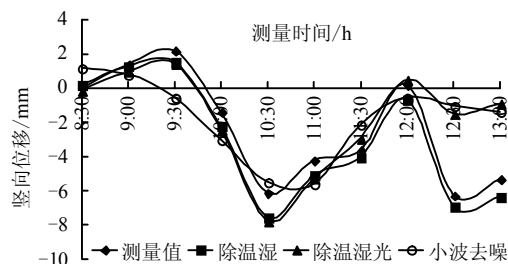


图2 8月19日测点4的竖向位移
Fig.2 Vertical displacements at measuring point No. 4 in Aug. 19

(3) 去噪后的值与数值模拟计算值对比分析

图3给出了测点4竖向位移基于考虑气象因素影响的小波分析方法去噪后的变形值与数值模拟计算值的对比分析结果。其中,为了便于数据分析,将奥运铁人3项比赛2 d的数据放在同一张图中,图中8:30~13:00对应奥运第1 d(8月18日8:30~13:00)的数据,14:30~19:00对应奥运第2 d(8月19日8:30~13:00)的数据。

由图3可知,基于考虑气象因素影响的小波分析方法去噪后的变形值与数值模拟的计算值^[11]基

本规律较为一致,能够反映十三陵水库大坝在奥运会期间的变形规律,进一步验证了考虑气象因素影响的坝体沉降小波分析方法的可行性。

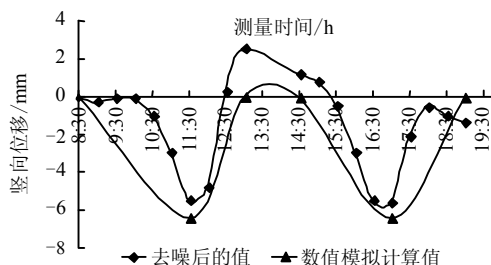


图3 去噪后的值与数值模拟计算值对比图
Fig.3 Comparison of vertical displacements acquired by numerical simulation and de-noising processing

4 结 论

对坝体监测数据直接进行小波消噪,可以消除外界不确定因素的干扰,但不能消除气象因素(温度、湿度及光照)的影响。本文提出考虑气象因素影响的坝体沉降小波分析方法,得出如下几点结论:

(1) 通过建立温度、湿度和光照强度对大坝变形响应的多项式函数,可以有效消除监测数据中温湿、光3种气象因素及其相互作用的影响。

(2) 基于消除气象因素影响后的监测数据进行小波分析,更易于捕获到真实的噪声,去噪处理结果更符合实际,可作为评价大坝稳定性的依据。

(3) 利用考虑气象因素影响的小波消噪分析所获得的大坝监测沉降曲线与数值模拟计算结果规律相同,最大变形值十分接近;进一步说明本文方法可行有效,实用性强。

参 考 文 献

- [1] 韩冰,王芝银. 基于小波变换的岩石三轴蠕变曲线消噪分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 243—247.
HAN Bing, WANG Zhi-yin. Analysis of de-noising based on wavelet transform in triaxial creep experiment of rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(3): 243—247.
- [2] 李刚,谢云,陈正汉,等. 小波分析在试验信号消噪方面的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 103—105.
LI Gang, XIE Yun, CHEN Zheng-han, et al. Application of wavelet analysis to filtering noise of test signal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 103—105.

- [3] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙, 等. 岩石高边坡安全监测数据的小波变换去噪处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1837—1844.
LIANG Gui-lan, XU Wei-ya, TAN Xiao-long, et al. De-noising processing of safety monitoring data for high rock slope based on wavelet transform[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1837—1844.
- [4] 阎振, 陆阳, 余建华, 等. 小波分析在边坡深部水平位移监测数据降噪中的应用[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 41—44, 55.
YAN Zhen, LU Yang, YU Jian-hua, et al. Application of wavelet analysis to noise removal for slope's displacement monitoring data[J]. **Central South Highway Engineering**, 2007, 32(2): 41—44, 55.
- [5] 李长冬, 唐辉明, 胡斌, 等. 小波分析和RBF神经网络在地基沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1917—1922.
LI Chang-dong, TANG Hui-ming, HU Bin, et al. Research on application of wavelet analysis and RBF neural network to prediction of foundation settlement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1917—1922.
- [6] 张亮, 元松, 曾胜. 基于小波—神经网络的软土路基沉降预测方法[J]. 中外公路, 2006, 26(3): 66—69.
ZHANG Liang, YUAN Song, ZENG Sheng. The prediction method of soft subgrade settlement based on wavelet and neural network[J]. **Journal of China & Foreign Highway**, 2006, 26(3): 66—69.
- [7] 赵燕容, 袁宝远. 基于小波的时序改进法在深基坑监测中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3381—3386.
ZHAO Yan-rong, YUAN Bao-yuan. A method based on time series improvement method of wavelet applied to deep foundation pit monitoring[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3381—3386.
- [8] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436—1440.
PENG Qi, ZHANG Ru, XIE He-ping, et al. Prediction model for rockburst based on acoustic emission time series[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1436—1440.
- [9] 聂学军, 侯玉成, 卢兆辉. 小波分析在大坝安全监测数据处理中的应用研究[J]. 红水河, 2004, 23(2): 106—109.
NIE Xue-jun, HOU Yu-cheng, LU Zhao-hui. Study on the application of wavelet analysis in data processing for dam safety monitoring[J]. **Hongshui River**, 2004, 23(2): 106—109.
- [10] 陈继光, 李光东, 刘中波. 大坝变形数据处理中的离散小波分析方法[J]. 水电能源科学, 2003, 21(4): 11—13.
CHEN Ji-guang, LI Guang-dong, LIU Zhong-bo. Wavelet analysis and its applications in deformation data of dam[J]. **Water Resources and Power**, 2003, 21(4): 11—13.
- [11] 王芝银, 李云鹏, 袁鸿鹄, 等. 第二十九届奥林匹克运动会铁人三项比赛场地十三陵水库大坝动态变形监测与预警技术[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2008.