

文章编号: 1001-8166(2008)06-0590-05

小波变换后的噪声信息在大坝变形 监测精度评定中的应用*

吴兆福, 高 飞, 陶庭叶

(合肥工业大学土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 评定变形监测精度, 除了仪器的标称测量精度外, 还应考虑到外界观测条件等随机因素的变化对测量结果的影响, 这类影响通常以随机噪声的形式表现在整个变形监测过程中, 可利用小波变换提取出来, 作为评定变形监测精度的偶然误差部分。以实例进行实验研究, 综合考虑了仪器的系统误差以及随机因素引起的偶然误差, 客观地评价了变形监测工作的质量。

关 键 词: 小波变换; 变形监测; 精度; 噪声

中图分类号: TP39.41; TU196+.1 **文献标志码:** A

当前, 人们针对各种变形体(如大坝)进行变形监测, 采用的变形监测数据处理方法有很多, 其中利用小波变换进行变形监测分析是一种非常重要的分析研究方法^[1], 在变形监测数据处理中有着广泛的应用。这种方法主要是利用小波分析具有的多分辨率的特点, 以及在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力, 对原始信号中包含的各种频率成分进行分解, 去除观测序列中的噪声, 进而提取和观察变形监测对象的动态特性。然而在利用小波变换进行变形监测数据分析中, 人们往往关注的是消噪后的观测数据, 而忽视了噪声的作用, 实际上用小波变换消除的噪声在变形监测中也有着很好的用处, 所分离出的噪声实质上反映了变形监测系统的观测精度, 可进行变形监测精度的评定^[2]。由误差理论可知, 影响测量精度的因素主要有 3 类: 仪器误差、观测误差以及外界条件的影响, 如果剔除粗差并且对系统误差按一定方式进行改正后, 对于独立的直接观测点来说, 可采用中误差计算公式或白塞尔公式来评定偶然误差影响下观测值的观测精度, 然而在变形监测中, 由于观测值本身包含变形监测点下沉

或偏移值的影响, 无法利用上述公式进行精度的评定, 人们往往只能根据测量仪器的标称精度来评定独立的变形监测点的测量精度, 没有考虑外界条件对观测的影响, 因此这种精度评定是不全面的。外界观测条件, 如温度、季节、大气折光、湍流等自然条件以及其他随机因素的变化(包括测量仪器中的部分仪器测量误差)对变形监测过程产生的影响通常是以随机噪声的形式表现在变形观测值中, 可以利用小波变换等方法将这种噪声信息提取出来, 进行变形监测点测量精度的评定。本文试图将这种精度评定方法引入变形监测中, 以期能够更为客观地评价变形监测工作的质量。

1 小波变换理论

有着“数学显微镜”美誉的小波变换方法在时域和频域具有高度的自适应性, 其高频分量采用逐步精细的时域或空域步长, 可以聚焦到所处理信息的任意细节, 因而在信号处理中得到了广泛的应用^[3]。

对于某信号 $f(t) \in L^2(R)$, 定义 $f(t)$ 的小波变

* 收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2008-04-29.

* 基金项目: 合肥工业大学博士基金项目“基于 GIS 和遥感技术的校园地表三维景观重建的研究”(编号: 107-035023)资助.

作者简介: 吴兆福(1972-), 男, 安徽庐江人, 副教授, 博士, 主要从事遥感影像数据处理、GPS 与地理信息系统的研究与应用等.

E-mail: wzfhh@163.com

换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{s}\right)} dt \quad (1)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为分析小波 (analyzing wavelet), 其中, a 为尺度因子; b 为平移因子, 系数 $|a|^{-1/2}$ 为归一化常数。可见, 小波变换本质上是把小波函数作为带通滤波器进行滤波, 并把原始信号分解为一系列频带上的信号, 而与小波变换相对应的小波反变换则进行原始信号 $f(t)$ 的重构:

$$f(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^2} \quad (2)$$

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\widehat{\Psi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega \quad (3)$$

平方可积函数空间 $L^2(\mathbb{R})$ 上的多分辨率分析是满足一定条件的闭子空间系列 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$, 应用多分辨率分析将该空间进行正交分解。设 W_{j+1} 是 V_{j+1} 在 V_j 上的正交补空间, V_j 表示信号分解的低频部分, W_j 为高频部分。即:

$$V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1} \quad (4)$$

从而可得:

$$V_j = W_{j+1} \oplus W_{j+2} \oplus \cdots \oplus W_{j+k} \oplus V_{j+k} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 = \cdots \\ &= V_j \oplus W_j \oplus W_{j-1} \oplus \cdots \oplus W_1 \end{aligned} \quad (6)$$

对于 $f \in L^2(\mathbb{R})$, 若 $f_k \in V_k$ 和 $g_k \in W_k$, 则 $f_k = f_{k+1} + g_{k+1}$, 且:

$$\begin{aligned} f &= f_1 + g_1 = f_2 + g_2 + g_1 = f_N + g_N + \cdots + \\ &g_2 + g_1 = f_N + \sum_{j=1}^N g_j \end{aligned} \quad (7)$$

假设 $\{\phi_{k,n}; k, n \in \mathbb{Z}\}$ 是 V_k 的规范正交基, $\{\psi_{k,n}; k, n \in \mathbb{Z}\}$ 是 W_k 的规范正交基, 因此 f_k, g_k 可以分别表示为:

$$f_k = \sum_n c_n^k \phi_{k,n}, g_k = \sum_n d_n^k \psi_{k,n} \quad (8)$$

其中, ϕ 为尺度函数, ψ 为小波函数。因此分解算法为由 $\{c_n^{k-1}\}$ 求 $\{c_n^k\}$ 与 $\{d_n^k\}$, 重构算法为由 $\{c_n^k\}$ 与 $\{d_n^k\}$ 求 $\{c_n^{k-1}\}$, 其中:

$$c_n^k = \sum_l \bar{h}_{2n-l} c_l^{k-1}, d_n^k = \sum_l \bar{g}_{2n-l} c_l^{k-1} \quad (9)$$

$$c_n^{k-1} = \sum_l h_{n-2l} c_l^k + g_{n-2l} d_l^k \quad (10)$$

上述分解算法与重构算法称为 Mallat 算法, 其中 $\{\bar{h}_n\}$ 、 $\{\bar{g}_n\}$ 称为分解序列, $\{h_n\}$ 、 $\{g_n\}$ 称为重构序列。从分解和重建算法可见, 多分辨率分析和小波变换是有机地结合在一起。

2 变形监测精度的评定

2.1 变形监测测量噪声的提取

设含有噪声的变形观测数据 $s(t)$ 由原始变形监测数据 $f(t)$ 和随机测量噪声 $e(t)$ 组成, 其数学表达式为^[4]:

$$s(t) = f(t) + e(t) \quad (11)$$

在变形监测过程中, 原始变形监测数据 $f(t)$ 在时域和频域上是局部化的, 表现为低频特性, 在小波分解中它对应低频近似部分, 并且随着分解尺度的增大, 信号近似部分中包含的高频信息越来越少; 根据误差理论, 随机测量噪声 $e(t)$ 通常指的是随机误差 (偶然误差), 它在时频空间中的分布是全局性的, 在整个观测的时域内处处存在, 在频域上则表现为高频特性, 因此测量中的偶然误差主要集中在高频段, 这时可以考虑对小波分解高频系数的阈值量化, 即对第一到第 n 层的每一层高频系数, 选择一个阈值进行软阈值量化处理, 提取出分解后的细节分量中超过某一限定值的部分, 这样则可以获取变形监测过程中的测量噪声, 进而利用测量噪声进行变形监测精度的评定。具体步骤如下:

(1) 小波分解。选择紧支集正交小波基 Daubechies 小波系 db3 进行信号分解, 该小波系具有很好的时频分析性能, 支集最小, 小波滤波器系数个数少, 在分解与重构算法中所需的计算量少, 因此在工程领域中得到广泛应用。信号分解的层次可根据信号的长度通过公式计算确定, 工程中常用的分解层次为 3、4 层, 完成对原始信号的分解。

(2) 小波分解高频系数中测量噪声的提取, 即提取那些超过某一设定值的细节部分。本文是利用 Matlab 小波工具箱来完成噪声信息提取的, 使用 `thselect` 函数采用给定阈值法中的最大最小准则阈值规则 (minmax 规则) 来选择阈值, 并使用 `wthresh` 函数对高频系数进行软阈值量化处理。

(3) 测量噪声的小波重构。用提取出来的小波分解高频系数进行重构, 得到变形监测的随机测量噪声。

2.2 变形监测精度的评定

在变形监测精度的评定中, 通常采用仪器的测量精度来确定变形监测点的点位中误差, 但是在实际监测过程中, 影响变形监测精度的因素除了测量仪器外, 还与外界观测条件以及观测者的技术水平 (在采用全自动变形观测仪器时, 可忽略此项) 等随机因素的影响有关, 这类因素通常以测量噪声的形

式表现在整个观测的时域内,它也反映了实际变形监测精度的高低,因此在变形监测中,在利用仪器的测量精度评定点位观测精度外,可同时考虑采用提取某段观测时域内观测数据中的测量噪声进行精度评定^[5]。

(1) 基于仪器的标称测量精度确定点位误差。利用仪器测量精度来确定变形监测点的点位误差,通常是根据仪器的标称精度计算的。而利用全站仪进行变形监测时,其点位变形量的确定,实际上采用极坐标的方法来计算点位坐标。假设测站点为 $A(x_A, y_A)$ 点,变形监测点为 $B(x_B, y_B)$ 点,仪器的测角精度为 m_β ,测距精度为 m_s ,则:

$$x_B = x_A + D_{AB} \cos \alpha_{AB} \quad (12)$$

忽略已知点以及已知方向的误差,利用误差传播定律可得:

$$m_{x_B} = \pm \sqrt{\cos^2 \alpha_{AB} m_s^2 + (D_{AB} \sin \alpha_{AB})^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \quad (13)$$

同理可得:

$$m_{y_B} = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha_{AB} m_s^2 + (D_{AB} \cos \alpha_{AB})^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \quad (14)$$

则:

$$m_s = \pm \sqrt{m_{x_B}^2 + m_{y_B}^2} \quad (15)$$

(2) 利用观测噪声进行精度评定。变形监测测量噪声实际上反映了变形监测过程中外界观测条件等随机因素的影响,因此在提取出某个变形监测点在某一段观测时域内观测数据中的测量噪声 $\Delta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ (n 表示观测次数)后,利用下式可计算该点的观测中误差。

$$m_R = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_i \Delta_i]}{n}} \quad (16)$$

3 实例分析

港口湾水库是以防洪为主,结合发电、灌溉等综合利用的大型水利水电枢纽工程。水库大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高 68 m,坝顶高程 146 m,坝长 252 m。2000 年 10 月大坝施工基本完工,为满足大坝变形监测的需要,采用高精度、智能化、高速度的测量机器人 TCA2003 (该仪器的标称精度为:一测回方向中误差为 $\pm 0.5''$;测距中误差 $\pm (1 + 1 \times 10^{-6} \times D)$) 进行大坝外观变形监测。

本文利用该水库 2002.12.28-2003.03.06 共 69 天的大坝变形观测值 $\{y(i) i = 1 \sim 69\}$ 建立原始信号模型,变形观测时间序列可以看成是一个有不同频率

成分组成的数字信号序列,其中大坝在坝体自重和水压等荷载作用下发生徐变,坝体将向下游发生趋势性变形,这种趋势变形过程通常表现为低频率(长周期)的变化,由于观测时间较短(2 个月内),因此这里不考虑大坝因季节性库水位和气温的变化而产生的周期性(通常表现为年周期)变化,大坝受到随机因素及观测误差影响的随机部分,则表现为高频率(短周期)的震荡。利用前面叙述的处理方法,进行离散小波分解(采用 db3 小波 3 层分解)、噪声信息的提取(采用 minmax 规则确定噪声阈值)、小波变换重构处理,图 1 为原始信号、重构信号以及经过小波变换后提取的噪声信息的曲线图(分别以监测点 LT07 和 LT27 为例),重构信号部分反映了监测点水平位移的趋势变形分量,由图 1 中的重构信号部分可知,位于坝顶面的 LT07 监测点水平位移变形量最大达到 5 mm,其中在前 60 天中,水平位移变形量逐渐增大,然后出现小幅回弹,由于水库大坝于 2000 年就已竣工,距离本文实验数据的日期较长,大坝自重对监测点水平位移的影响逐渐减小,可忽略不计,这时影响监测点水平位移主要因素就是库水位,随着库水位的增加位移量逐渐增大,后期因发电的需要,库水位降低,导致水平位移变形量出现小幅回弹,显然这种现象符合实际情况,变形量处于安全范围;而位于下游坝底的 LT27 监测点水平位移变形量最大不超过 0.4 mm,变形量甚至小于仪器本身的测量误差,因此可认为该点水平方向基本没有发生影响,库水位的变化对下游坝底基本不产生影响。水库大坝变形监测采用大坝独立坐标系,以大坝轴线为 x 轴,以与大坝垂直向下游为 y 轴,在坝体表面建立了 5 条大坝外部变形观测视准线,共计 26 个监测点(LT4 ~ LT29),大坝变形监测点的平面位置分布如图 2 所示,以下游 K3 基准点作为测站点。在对连续观测了 69 天的 y 方向大坝变形观测数据进行小波变换噪声信息提取后,分别利用 13 ~ 16 式计算出各变形监测点的仪器观测精度以及外界观测条件等随机因素变化的影响,其结果如表 1 所示(表 1 中 m_R 表示变形监测中偶然误差部分,主要受随机因素变化的影响; m_s 表示变形监测中系统误差部分,主要反映了仪器的标称精度, m 表示实际变形监测精度, $m = \pm \sqrt{m_s^2 + m_R^2}$)。由于测量机器人 TCA2003 集目标识别、自动照准、自动测角测距、自动跟踪、自动记录于一体,因此在变形监测精度估算实践中,可忽略仪器的照准、读数以及由观测者的技术水平等引起的偶然误差,因此可

认为利用 13~15 式计算出的各变形监测点的仪器观测精度实际上主要反应了整个大坝变形监测系统中的系统误差部分,而根据小波变换提取出的观测噪声由 16 式计算出各变形监测点的观测精度实际上反应了受外界观测条件变化等随机因素引起的偶然误差部分。从表 1 可见,各变形监测点的仪器误差变化不大,最大误差互差仅为 0.11 mm,因此仅仅利用仪器的标称精度来衡量整个系统的监测精度,尚不够全面;然而各变形监测点由于空间位置的不同,因此在变形监测过程中,观测结果受外界观测条件,如温度、季节、风力、大气折光、湍流等自然条件的变化以及其他随机因素影响有着较大的差异,故

各变形监测点观测精度中的偶然误差部分也有着相对较大的差异,最大相差达到 0.76 mm,这里通过综合仪器系统误差和观测值偶然误差的影响,反映了大坝变形的实际测量精度。根据港口湾水库变形监测精度的规划设计,面板堆石坝变形点平面精度要求为:

$$m_x, m_y \leq 3.0 \text{ mm}, m = \sqrt{2}m_x = 4.24 \text{ mm}$$

由表 1 可知,港口湾水库大坝的实际观测最小误差为 0.973 mm,最大误差为 1.239 mm,均小于 4.24 mm,显然精度都在容许范围内,满足规划设计的

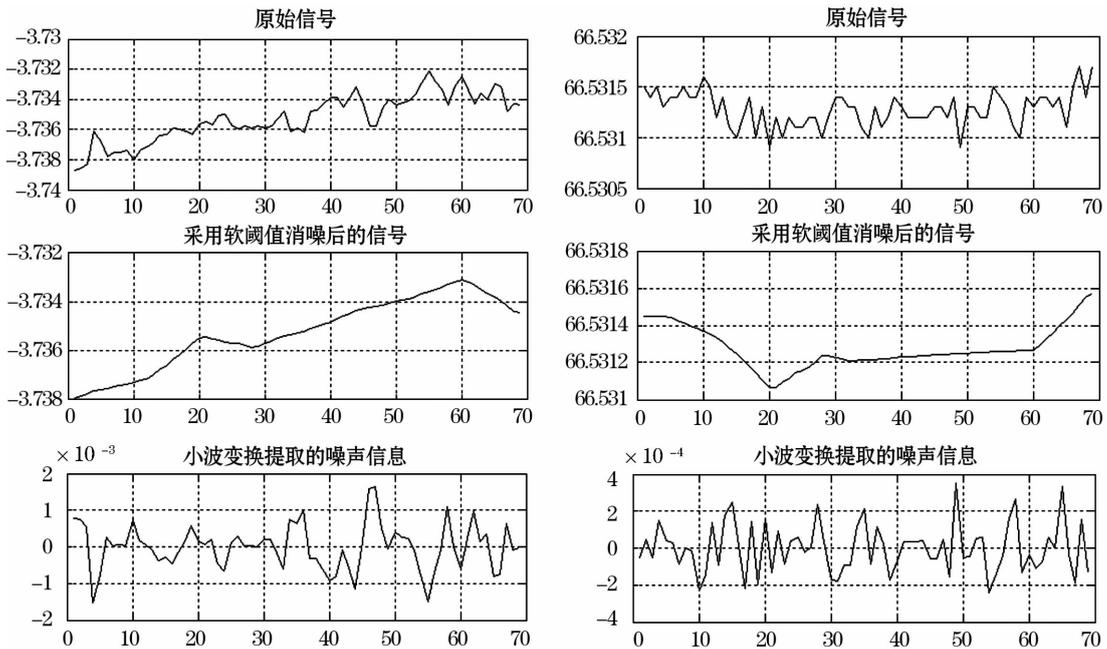


图 1 LT07 和 LT27 号变形监测点的原始信号、小波重构信号以及提取的噪声信息

Fig. 1 Origin, wavelet reconstruction signal and noise of LT07 & LT27 deformation monitoring points

4 结 语

利用测量仪器的标称精度计算的中误差仅反映了仪器的测量精度,并不能够完全、准确考虑到外界观测条件如温度、季节、风力等自然条件的变化以及其他随机因素对变形监测过程产生的影响,而利用小波变换所分离出的噪声反映了变形监测系统的观测精度。用这种方法评定的精度不仅包含测量仪器的测量误差(偶然误差部分),而且也考虑了实际观测条件对变形监测的影响,这种影响是以随机噪声的形式存在于变形观测值中,利用小波变换提取后,可作为偶然误差影响下的观测精度,结合仪器测量

中的系统误差部分,从而可计算出实际变形监测精度。本文首次将这种综合考虑仪器测量误差和观测条件变化等随机因素导致的偶然误差对变形观测值影响的精度评定方法引入变形监测中,期望可以更为客观地评价变形监测工作的质量。但是利用小波变换进行变形监测精度的评定,受采用的小波基函数、噪声提取算法不同以及小波分解层数不同的影响。小波变换进行信号的分解与重构时,应该寻找一组最能代表信号特征的函数形式,将信号用这些量来逼近,或者写成这些量的线性组合形式。小波函数有无穷多个,故小波基也有无穷多组,不同的小波基具有不同的时频特征,用不同的小波基分析同

表 1 各变形监测点变形监测精度表 (mm)

Table 1 Deformation monitoring precision of all deformation monitoring points

点号	m_R	m_S	m	点号	m_R	m_S	m
LT04	0.607	0.996	1.166	LT17	0.112	0.994	1.000
LT05	0.473	1.000	1.106	LT18	0.162	0.974	0.988
LT06	0.644	0.995	1.185	LT19	0.264	0.943	0.980
LT07	0.615	0.978	1.155	LT20	0.389	0.904	0.984
LT08	0.665	0.951	1.160	LT21	0.073	1.000	1.003
LT09	0.835	0.916	1.239	LT22	0.180	0.993	1.009
LT10	0.736	0.887	1.153	LT23	0.186	0.970	0.988
LT11	0.113	1.000	1.006	LT24	0.352	0.935	0.999
LT12	0.185	0.994	1.012	LT25	0.375	0.903	0.978
LT13	0.203	0.977	0.997	LT26	0.099	1.000	1.005
LT14	0.561	0.948	1.102	LT27	0.134	0.992	1.001
LT15	0.470	0.912	1.026	LT29	0.296	0.927	0.973
LT16	0.084	1.000	1.004				

变形监测点平面分布图

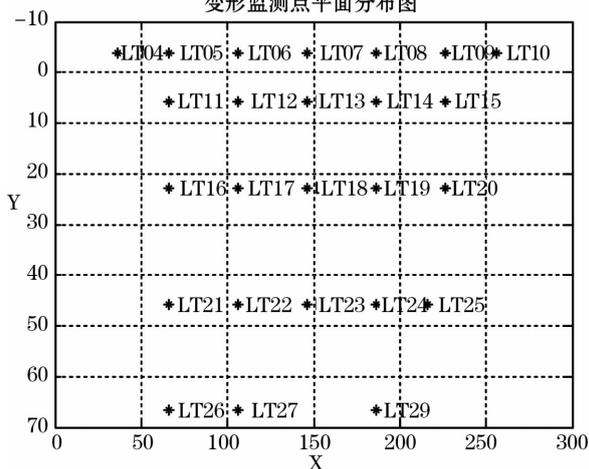


图 2 大坝变形监测点的平面分布图

Fig. 2 Plan distribution map of dam deformation monitoring points

一个问题会产生不同的结果;小波变换中当分解层数过多时,会造成有用信号信息的丢失,分解层数

过少时,导致不能有效地提取噪声,进而影响精度的评定,因此可考虑在准确检验噪声的基础上自适应确定小波分解的层数。另外在给定阈值消噪处理中,有多种阈值选取规则,如通用阈值规则 (sqtwolog 规则)、无偏风险阈值规则 (regrsure 规则)、混合型阈值规则 (heursure 规则) 和最大最小准则阈值规则 (minmax 规则)^[4]。因此能否选择合适的小波基以及合适的分解层数,并采用某种阈值规则选择合适的阈值,准确地从观测数据中提取出噪声,是决定能否可靠地评定变形监测精度的关键。

参考文献 (References):

- [1] Yue Jianping, Fang Lu, Li Ni. Research advances of theory and technology in deformation monitoring [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007, 7:1-4. [岳建平, 方露, 黎妮. 变形监测理论与技术研究进展 [J]. 测绘通报, 2007, 7:1-4.]
- [2] Huang Shengxiang, Liu Jingnan, Liu Xianglin. Deformation analysis based on wavelet and its application in dynamic monitoring for high-rise buildings [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(2):153-157. [黄声享, 刘经南, 柳响林. 小波分析在高层建筑动态监测中的应用 [J]. 测绘学报, 2003, 32(2):153-157.]
- [3] Cheng Zhengxing, Lin Yongping. Some applications in image procession with wavelets [J]. *Journal of Engineering Mathematic*, 2001, 18(5):57-86. [程正兴, 林勇平. 小波分析在图像处理中的应用 [J]. 工程数学学报, 2001, 18(5):57-86.]
- [4] Du Haofan, Cong Shuang. The study on wavelet de-noising under the environment of MATLAB [J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(7):120-122. [杜浩藩, 丛爽. 基于 MATLAB 小波去噪方法的研究 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(7):120-122.]
- [5] Zhang Qin, Jiang Tingchen, Wang Xiuping. Research on application of wavelet transform to deformation observation [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2005, 14(1):8-10. [张勤, 蒋廷臣, 王秀萍. 小波变换在变形监测中的应用研究 [J]. 测绘工程, 2005, 14(1):8-10.]

Application of Noise Information Based on Wavelet Transformation in Evaluating Precision of Dam Deformation Monitoring

WU Zhaofu, GAO Fei, TAO Tingye

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to assess accuracy of deformation monitoring, we should consider not only measurement accuracy of instrument, but also influences of field condition errors. All these influences exist with random noise during the whole deformation monitoring. We can separate it from observations with wavelet transformation, and assess accuracy of deformation monitoring as random error. Some experiments are done with actual observations, and system error and random error caused by influences of instrument error and random noise are considered. Therefore we can evaluate the quality of deformation monitoring objectively.

Key words: Wavelet transformation; Deformation monitoring; Precision; Noise.