

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.020

基于多小波的分布式光纤温度传感监测数据处理

岳建平¹,席广永¹,黎 昵²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.南海西部石油勘察设计公司,广东 湛江 524057)

摘要:分布式光纤温度传感监测系统采集的数据不可避免地存在噪声,为有效地探测和消除噪声,得到更可靠的温度监测数据,根据多小波原理及特性,结合矩阵预处理法和重复行预处理法,提出改进的矩阵预处理方法和新的软阈值方法,并应用于大坝 DTS 采集的温度数据消噪.结果表明,改进的多小波矩阵预处理方法比未改进的多小波预处理方法及 DB4 单小波方法有更高的信噪比,且去噪效果性能更好,在消噪处理方面具有较好的应用潜力.

关键词:渗漏监测;多小波变换;数据处理;滤波;分布式光纤温度传感器

中图分类号:TV698.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)05-0675-04

大坝安全监测信息采集是通过监测仪器对大坝坝体、坝基、坝肩、近坝区岸坡及大坝周围环境进行测量的^[1-2].大坝安全监测信息采集获得的有效监测数据是进行大坝安全分析和评估的基础^[3],其重要性引起了对原型观测的高度重视.安全监测技术现在正向高精度、高稳定性和自动化方向发展,监测内容和手段不断丰富.目前常规的监测仪器如渗压计、测缝计、钢筋计、应变计、多点位移计等只能满足点式测量,无法实现分布式监测.

分布式光纤温度传感监测系统(DTS)具有测量范围广、空间分辨率高、精度高以及便于实现自动化等优点^[4-6],在大范围的温度测量以监测坝体的渗漏方面具有广阔的应用前景.但利用分布式光纤测温系统进行渗漏监测所获取的测温数据不可避免地存在噪声,从而影响监测数据的准确分析.本文采用改进的多小波矩阵预处理法对测温数据进行去噪处理,并通过与未改进的多小波预处理法及传统改进阈值的单小波方法的比较,分析了多小波在监测数据处理中的应用效果.

1 多小波的基本理论

令 $\Phi(t)=(\varphi_1(t),\varphi_2(t),\dots,\varphi_r(t))^T$ 是多分辨率分析空间的正交多尺度函数,则与其对应的正交多小波函数 $\Psi(t)=(\psi_1(t),\psi_2(t),\dots,\psi_r(t))^T$ ($r\in\mathbf{N}$) 满足其平移和伸缩, $\Psi_{j,k}=(\Psi_1(2^{-j}x-k),\dots,\Psi_r(2^{-j}x-k))^T$ ($j,k\in\mathbf{Z}$) 形成正交补子空间的正交基.即 V_j 在 V_{j+1} 中的补子空间 W_j ,多尺度函数 $\Phi(t)$ 满足^[7-8]

$$\Phi(t)=\sum_{k=0}^M H_k\Phi(2t-k) \tag{1}$$

$$\Psi(t)=\sum_{k=0}^M G_k\Phi(2t-k) \tag{2}$$

式中 H_k 和 G_k 都是 $r\times r$ 的矩阵,称为矩阵滤波器系数.

将正交单小波的 Mallat 算法推广到正交多小波,得到多小波系数重构公式:

$$\begin{bmatrix} c_{0,n}^{(j-1)} \\ c_{1,n}^{(j-1)} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \sum_{n=0}^3 \left(G_k^* \begin{bmatrix} c_{0,n}^{(j-1)} \\ c_{1,n}^{(j-1)} \end{bmatrix} + H_k^* \begin{bmatrix} d_{0,n}^{(j-1)} \\ d_{1,n}^{(j-1)} \end{bmatrix} \right) \quad (j,k\in\mathbf{Z}) \tag{3}$$

式中: $c_{i,2k+n}$ ——尺度系数; $d_{i,2k+n}$ ——小波系数; H^* 和 G^* —— H 和 G 的共轭转置.

2 多小波的预处理

根据信号消噪原理,多小波与传统小波没有本质区别,即在多小波分解系数的基础上,根据噪声的先验知识,设置阈值处理多小波系数,将与噪声相应的多小波变换系数置零,然后利用多小波的重构算法重构信号。另外,利用多小波消噪,每一层阈值可以根据实际情况设置多个,而传统小波一般只在每一层设置1个阈值。所以基于多小波变换的消噪不仅完整保留传统小波消噪的优点,而且具有更为灵活实用的特点。

多小波预处理与分解变化如图1所示^[9],多小波重构与后滤波处理如图2所示。

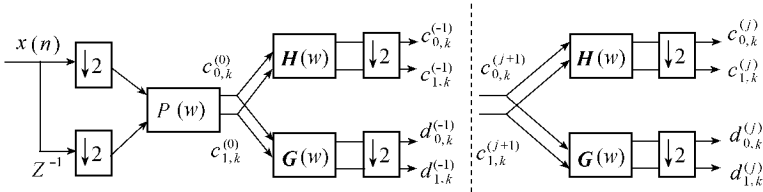


图1 多小波预处理与分解

Fig.1 Sketches of multi-wavelet pre-processing and decomposition

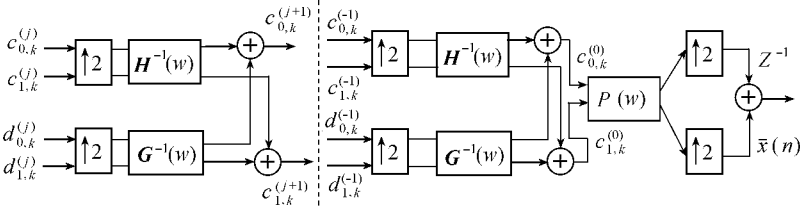


图2 多小波重构与后处理

Fig.2 Sketches of multi-wavelet reconstruction and post-processing

3 改进的矩阵预处理法

不同的预处理方法对多小波滤波器的响应会产生不同的影响,也会对信号处理的效果产生一定的影响。矩阵预处理法对 DGHM 多小波滤波器响应改善以及消噪效果最佳,但对于所采集的 DTS 温度监测信号,大量验算表明,如果初始采样方式合适,有时重复行预处理法也可得到比矩阵预处理法更好的消噪效果。为此,本文以矩阵预处理法与重复行预处理法为基础,根据多小波的原理及特性,提出一种改进的矩阵预处理方法^[10],该法基本思想如下:

设给定的连续信号 $f(n) \in V_0$, 采样信号为 $x(n), n = 0, 1, \dots, 2N - 1$, 利用重复采样对信号特征提取相当有效及矩阵预处理对信号消噪在突变位置的良好保持等特点,取采样方式为

$$x(2n) = a f(n) \quad x(2n + 1) = f(n + 1/2) \quad (0 \leq n \leq N - 1, a \text{ 为一常数})$$

考虑到 GHM 多小波尺度函数的特点, $\varphi_0(t)$ 的紧支集为 $[0, 1]$, $\varphi_1(t)$ 的紧支集为 $[0, 2]$, 可推得初始系数为

$$\begin{cases} c_{0,m}^{(0)} = \frac{ax(2n + 1)\varphi_1(1) - \varphi_1(1/2)[x(2n) + x(2n + 2)]}{a\varphi_0(1/2)\varphi_1(1)} \\ c_{1,m}^{(0)} = \frac{x(2n + 2)}{a\varphi_1(t)} \end{cases} \tag{4}$$

在利用传统小波信号处理时,一般希望分解后的低频系数集中信号的更大能量,高频系数能够包含信号更精细的信息,从而为信号分解后的进一步处理提供更好的前提条件。为此,定义多小波低频系数能量集中率为

$$P_e = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^r |c(k, l)|^2}{\sum_{n=1}^M |x(n)|^2} \times 100\% \tag{5}$$

式中: r ——多小波的维数; j ——多小波分解层数; K ——在 j 层上多小波分解的尺度系数个数; M ——信号

的采样点数 $i c_j^l$ ——多小波分解后的尺度系数 $\alpha(n)$ ——原始信号的采样数据.

对于已知的监测信号,其 P_e 值越大,表示多小波分解系数能量更集中在低频部分,更适合应用于信号消噪.以 DTS 系统的温度监测信号为例,将其 5 层分解后,计算不同预处理方法的多小波分解后的系数能量集中率,如表 1 所示.

由表 1 计算结果可见,不采用预处理方法的小波低频系数能量集中率不高,而采用预处理方法的多小波低频系数集中率明显较大.其中改进的矩阵预处理法能量集中率最好,说明效果最好;其次是矩阵预处理法,能量集中率为 93.62%.重复行预处理法由于其是重复采样,运行速度明显较慢,所以能量集中率显得较低.对大坝其他时段及不同部位的大量观测数据进行能量集中率试算分析的结果与以上结论基本类似.

4 温度监测数据的处理

某混凝土面板堆石坝的周边缝布设了分布式光纤温度传感监测系统.对一期工程监测中获得的部分平均数据进行分析.采用 DGHM 多小波对监测数据进行消噪处理,并传统单小波 DB4 小波进行比较.因为 DB4 小波具有 4 个稀疏的滤波器及其正交性和二阶消失矩等特点,与 DGHM 多小波相似.多小波的预处理采用改进的矩阵预处理法与矩阵预处理法.在阈值化过程中,多小波采用软阈值改进形式 $\delta = k\sigma \sqrt{2\lg N} / \ln(e + j - 1)$ 处理多小波高频系数,单小波采用默认软阈值及给定软阈值进行处理,分解层数均为 5 层.

图 3 为原始观测数据,采样点数为 1 024.原始信号波形图有许多小的波动,波动的产生除由光波传输自身导致外,还包括仪器产生的噪声波及环境温度等多种因素的影响.要提高分析精度,首先应将噪声的影响消除.

利用 DB4 小波与 DGHM 多小波消噪 2 种小波均进行了 5 层分解.DB4 小波分别采用默认软阈值与给定软阈值进行处理,消噪后的结果如图 4 所示.

DGHM 多小波采用给定软阈值,并用矩阵预处理法和改进的矩阵预处理法 2 种不同方法进行处理,其滤波效果见图 5.

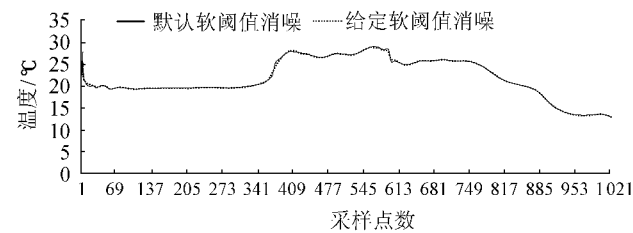


图 4 DB4 默认软阈值与给定软阈值消噪信号
Fig.4 De-noising signals of default and given soft-thresholds

从图 4、5 可以看出:

- a. 默认阈值化消噪的曲线比较平滑,基本保持了原信号的整体趋势,但在曲线突变的地方却有失真真实性.
- b. 由于给定的阈值一般由经验公式获得,所以其阈值比默认阈值可信度高.而本文提出的改进值形式,可以在每个分解尺度上选择不同的阈值,在消噪效果上得到了很大的改善,其处理结果比默认阈值好.
- c. 矩阵预处理法与改进的矩阵预处理法处理的结果都很好保留了信号的峰尖部分,但改进的矩阵预处理法效果最好.

表 1 多小波不同预处理方法的 P_e 值
Table 1 Pevalues of different multi-wavelet pre-processing methods

预处理方法		$P_e/\%$
DB4 小波		44.35
	重复行预处理法	52.48
	矩阵预处理法	93.62
	改进的矩阵预处理法	95.37

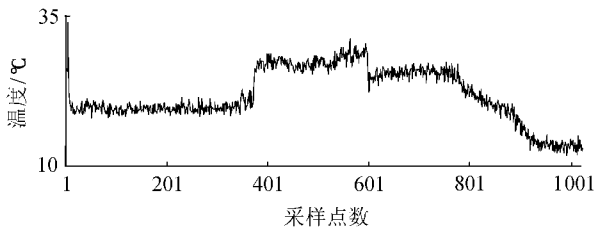


图 3 一期首部光纤传感测温信号
Fig.3 First duration temperature signal of header fiber sensor

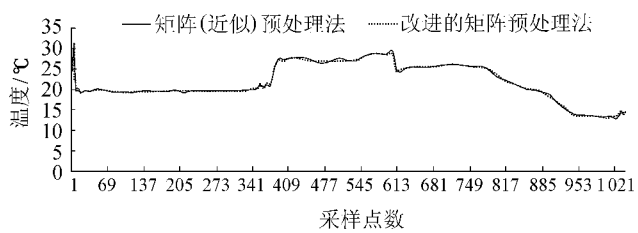


图 5 矩阵预处理法和改进的矩阵预处理法消噪信号
Fig.5 De-noising signals of traditional matrix pre-processing and improved matrix preprocessing methods

为比较各种方法的消噪效果,采用均方根误差、绝对平均误差及信噪比进行计算,计算结果见表2。

从表2可知,改进的多小波矩阵预处理方法比未改进的矩阵预处理方法及单小波方法有更高的信噪比,且去噪效果更好。

5 结 语

本文探讨了基于多小波信号消噪的基本原理,并针对现存方法的特点及其不足,提出了改进的矩阵预处理方法。根据给定的实际监测信号,采用多小波低频系数能量集中率准则对几种预处理方法进行优选,以确定更适合监测数据的预处理方法。将基于改进的矩阵预处理法的 DGHM 多小波变换应用于分布式光纤温度监测信号消噪处理,得到比传统多小波预处理法及 DB4 单小波更好的消噪效果,且很好地保持了曲线的光滑性、趋势性及重要突变点的变化特性。多小波变换应用于工程实测数据消噪处理,可取得良好的消噪效果。

参考文献:

[1] DLT5178—2003,混凝土大坝安全监测技术规范[S].

[2] 王润英.大坝安全监测的内涵及扩展[J].四川水利发电,2002,21(4):88-90.

[3] 宋小刚,李德仁,华锡生,等.基于数据仓库技术的大坝资料分析与安全决策系统研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):280-284.

[4] 施伟,黄德修,刘德明,等.分布式光纤传感器的研究与进展[J].半导体光电,1997,18(4):220-223.

[5] 吴永红,徐洪钟,高培伟,等.混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化[J].水利水电科技进展,2006,26(6):37-39.

[6] BAO X,DHLIWAYO J,HERON N,et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. Light Wave Tech,2001,13(7):1340-1347.

[7] 邹海林,宁书年,杨峰.多小波变换在 GPR 信号处理中的应用[J].计算机工程与应用,2004,16(10):213-216.

[8] 何永红,文鸿雁,袁海莲.基于多小波的变形监测信号处理[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(1):67-69.

[9] ANESTIS A,IRENE G. Detecting abrupt changes by wavelet method[J]. Nonparametric Statistics,2002,14(2):7-29.

[10] 黎昵.分布式光纤温度传感监测数据处理技术及应用研究[D].南京:河海大学,2007.

Processing of monitoring data from distributed optical fiber temperature sensor based on multi-wavelet

YUE Jian-ping¹, XI Guang-yong¹, LI Ni²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanhai West Oil Survey & Design Company, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The data acquired from distributed optical fiber temperature sensor systems inevitably has noise. In order to effectively detect and eliminate the noise and to acquire more reliable data, an improved matrix pre-processing method and a new soft threshold method were proposed and applied to eliminate the noise of temperature data collected from a distributed optical fiber temperature sensor system (DTS), based on the principle and characteristics of multi-wavelet transforms and combined with the traditional matrix pre-processing method and line repetition pre-processing method. The results show that the improved matrix pre-processing method has much higher signal-to-noise ratio (SNR) and better de-noising effect than the traditional matrix pre-processing method and DB4 wavelet method. Therefore, the method has better de-noising application potential.

Key words: leakage monitoring; multi-wavelet transform; data processing; filter; distributed optical fiber temperature sensor