

GPS 高层建筑物动态特性的小波分析提取

王 涛¹, 田林亚¹, 孔令杰², 张 洋³

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050;

3. 苏州地质工程勘察院, 江苏 苏州 215129)

摘要: 针对高层建筑物 GPS 动态监测数据特点, 该文将小波分析技术应用于高层建筑物动态特性提取, 研究了数据处理时 4 种阈值选取准则的好坏, 针对观测数据不同阶段振幅和频率不同, 提出分段、分层处理数据的思想, 为了获得更全面的观测信号, 将小波包分析应用于数据处理。结果表明: 自适应阈值准则更适用于高层建筑物动态数据处理, 采用分段分层的处理方法, 既能满足去噪要求又能提取丰富的变形信息, 小波包分析能有效提取高层建筑物动态特性, 保留更多的动态信息。

关键词: 动态特性; GPS; 小波分析; 小波阈值去噪; 小波包分析; 分段

【中图分类号】P228

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2018)04-0100-05

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.04.016

Wavelet analysis extraction using GPS high-rise buildings dynamic feature

Abstract: According to the characteristics of the high-rise building GPS dynamic monitoring data, wavelet analysis technology was applied to extract dynamic feature in high-rise buildings in this paper, and four kinds of threshold selection criterion were studied according to different phase of observed data with different frequency and amplitude, subsection and delamination processing signal were put forward in order to obtain more comprehensive observation signals, wavelet packet analysis was applied to data processing. The results showed that the adaptive threshold criterion was more suitable for dynamic data processing in high-rise buildings, using segmented and layered method handle signal can de-noising well and extract abundant deformation information, wavelet packet analysis can extract dynamic characteristics in high-rise buildings effectively, and keep more dynamic information.

Keywords: dynamic feature; GPS; wavelet analysis; wavelet threshold de-noising; wavelet packet analysis; subsection

WANG Tao¹, TIAN Linya¹, KONG Lingjie², ZHANG Yang³ (1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Suzhou Geological Engineering Investigation Institute, Suzhou, Jiangsu 215129, China)

0 引言

随着高层建筑物的日益增多, 对高层建筑物

的动态特性进行实时监测至关重要, 特别是监测受到风振、地震等外界因素影响下建筑物的实时动态特性, 对衡量建筑物的安全状况十分必要, 将 GPS 技术应用于高层建筑物的结构动态监测被认为是十分有效的方法^[1-6]。利用 GPS 监测高层建筑物的观测数据主要包括两个方面: 一方面是建筑物自身的振动及外界环境引起的实际偏移; 另一方面是观测误差引起的噪声和粗差。高层建筑物的振动变形表现为缓慢变化, 观测噪声表现为高频率变化, 两者与小波多分辨率分析中的低频部分和高频部分分别对应。利用小波分析技术处理 GPS 动态观测信号是工程上常采用的方法^[6-9]。

高层建筑物的振动一般具有简谐特性^[1], 针对



作者简介: 王涛(1992—), 男, 安徽蒙城人, 硕士研究生, 主要研究方向为测量数据处理、三维激光扫描应用。
E-mail: hkingt121@163.com

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研项目(2016-KY-03); 江苏省研究生

科研与实践创新计划项目(KYCX17_0506)

通信作者: 田林亚 教授 E-mail: lytian3609@sina.com

高层建筑物 GPS 观测数据特点, 在采用小波分析技术进行数据处理时采用一些方法可以获得更好的动态变形信息。本文设计了振动实验, 模拟高层建筑物在风振等因素影响下的动态特性, 并采用 GPS 技术进行实时监测, 然后利用小波分析技术对观测数据进行处理与分析。本文研究了不同阈值选取方法对观测数据去噪效果的影响, 针对高层建筑物观测数据特点, 提出分段分层处理的方法, 并以各类评价指标对比分析, 针对高频信号中可能包含有用信息的情况, 研究了小波包分析在高层建筑物信号提取中的应用, 本文为高层建筑物的数据处理提供了参考。

1 小波分析应用于 GPS 动态数据处理

1.1 高层建筑物观测数据

GPS 观测数据不可避免地存在误差, 高层建筑物在安全监测时, 会将 GPS 接收机安置于高层建筑物上方开阔处, 一般情况下基线的布设都在数千米以内, 使用差分方法可以消除大部分误差, 但 GPS 多路径效应不会通过差分方法消除^[5]。可见, 监测高层建筑物时, GPS 观测误差主要是多路径效应。高层建筑物动态位移包含两个方面: 一方面是高层建筑物自身的振动, 建筑物的基振频率常在 0.1~10 Hz 之间, 振幅取决于建筑物的环境激励条件, 如建筑物的高度、风压及建筑结构的侧向刚度等^[6]; 另一方面是长周期的无规则运动, 这包括日照、温度变化, 风振、地震、车载等其他因素影响下的振动。一般来说, 高层建筑物的振动具有简谐特性。

1.2 小波阈值去噪

小波阈值去噪是一种简单、效果较好的去噪方法^[9-13], 小波阈值去噪的主要步骤如下: ①信号 S 的小波分解。选择一个合适的小波基函数和合理的小波分解尺度 N 进行小波分解; ②分解后高频系数阈值量化。对分解后各尺度的高频部分选择合适的阈值 t 进行处理, 所有小于 δ 的小波系数被划为噪声, 它们取 0, 而超过阈值 δ 的小波系数的数值被缩减后再重新取值; ③信号 S 的小波重构。将分解后各层低频部分和经阈值处理后的高频部分进行小波重构, 获得去噪后的信号。

小波阈值去噪的核心在于阈值的选取, 它直接关系到降噪的质量。小波阈值确定模型主要有由原始信号确定阈值和基于样本估计选取阈值, 后者主要包括 4 个准则: ①自适应阈值准则, 基于 stein 的无偏估计原理, 对一个给定的阈值 t , 计算

出它的似然估计, 然后将似然 t 最小化得到所选的阈值。②固定阈值准则, 它计算的阈值与信号的长度有关, 其计算公式为: $THR = \sqrt{2\log(n)\sigma}$ 。其中, n 为信号的长度, σ 是噪声强度。③启发式阈值准则, 它是①和②的折中, 当信噪比很小时按自适应阈值准则处理; 当信噪比很大时选择固定阈值准则。④极值阈值准则, 采用极小极大值原理选择阈值。本文研究在高层建筑物动态观测数据处理中 4 种阈值确定准则的去噪效果, 并以信噪比、均方根误差和平滑度指标进行量化分析。

1.3 分段分层提取信号特性

高层建筑物振动一般具有简谐特性, 当受到地铁、风振等因素影响时, 其振动的振幅和频率发生变化, 导致不同阶段观测数据序列具有明显的分化特点^[1]。GPS 动态监测也易受到阶段性噪声的影响, 在不同阶段噪声大小不同, 如在日照时间和非日照时间噪声大小不同。在 GPS 高层建筑物动态监测中若受到阶段性噪声的影响, 各层小波系数也会有阶段性变化, 针对不同阶段振动振幅大小不同、噪声大小不同的特点, 若采用相同的阈值去噪处理容易丢失真实信号, 导致在评判建筑物振动规律时产生偏差。如果能在小波分解系数量化时, 采取对观测数据序列分段降噪处理, 分尺度确定阈值大小, 然后再进行阈值处理, 理论上会取得更好的效果。

1.4 小波包分析应用于 GPS 动态特性提取

GPS 高层建筑物动态监测时, 数据源的采样频率大幅度提高, 数据量膨胀极大, 蕴涵的信息频段加宽。小波分析在信号分解时只对低频部分进行分解, 并认为变形信息只存在缓慢变化的低频部分, 导致在高频部分可能含有的重要信息丢失^[14]。小波包分析是小波分析的延伸, 它将分解频段进行多层次划分, 对在多分辨率分析中没有分解的高频部分进行分解, 并且能够根据信号的特征自适应地选择相应频带与原始信号的频谱特性相匹配, 大大提高了时频分辨率, 使提取的变形信息更为全面。将小波包分析应用于高层建筑物 GPS 观测数据动态特性提取, 是对小波分析技术的补充。

2 实验分析

2.1 观测数据

本文采用香港理工大学 GPS 振动平台上的振动观测实验数据, 模拟高层建筑物受地铁和风振等外界因素作用下的动态特性。振动测试时, GPS

接收机类型为 LEICA GX1230, GPS 采样频率为 20 Hz, 卫星截止高度角为 15°, 振动平台的振动频率为 0.025 Hz, 振幅模拟精度优于 0.1 mm, 观测建筑物在 X、Y、Z 中 3 个方向的位移变化。选择前 1 200 个观测历元的数据进行分析, X、Y、Z 的 3 个方向的原始观测数据如图 1。从图 1 中可以看出 3 个方向都受到严重噪声的影响, 无法直接获取观测体变化趋势, 3 个方向在 160 历元以前位移变化较大, 说明在这个阶段建筑物受到外界因素影响振幅较大, 3 个方向所受影响大体相同, 在 Z 方向观测数据存在明显的简谐特性。

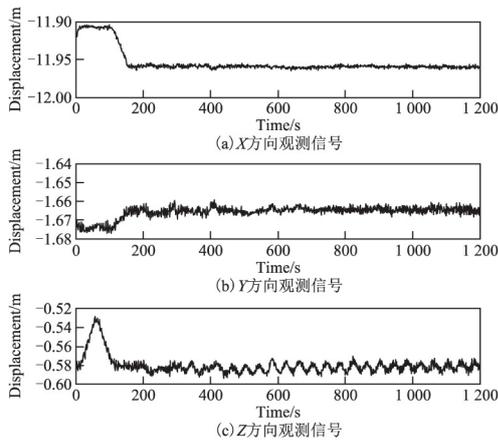


图 1 X、Y、Z 方向原始观测数据

Fig 1 X, Y, Z Direction Original Observed Data

2.2 小波阈值选择

在小波阈值去噪中, 4 种阈值确定准则都有不同的适用范围, 针对不同的数据类型, 不同作者提取了最优的阈值确定准则, 文献 [9] 中认为固定阈值最优, 文献 [15] 选择了自适应阈值进行数据处。本文对此进行了实验, 同时对 X、Y、Z 的 3 个方向观测数据进行处理, 研究高层建筑 GPS 动态观测数据处理中 4 种阈值选取准则的好坏。实验时, 选择了去噪效果好的 sym12 小波基函数^[9], 进行 3 层尺度分解, 选择软阈值处理, 限于篇幅有限, 只列出 Z 方向数据处理结果, 去噪后结果如图 2, 各项评价指标如表 1。

信噪比(signal noise ratio, SNR)是衡量含噪信号去噪效果好坏的重要指标, 信噪比越大, 说明该方法的去噪效果越好。均方根误差(root mean square error, RMSE)表现了原始信号与去噪后信号之间的差异, 均方根误差越小, 表示信号去噪的效果越好。平滑度(R)表示去噪后信号的光滑程度, 平滑度的值越小, 表示信号越光滑, 去噪的效果越好。

根据图 2 和表 1 分析, 4 种阈值确定准则下,

原始信号基本消除了噪声的干扰, 获得了建筑物的动态变形特征。自适应阈值最小且与原始观测值大小相近, 启发式阈值按固定阈值准则确定的, 两者相同。固定阈值准则去噪后的信号平滑性更好, 自适应阈值保留了原始信号较多的特征, 仅观察 279 历元处存在的异常值, 考虑高层建筑物变形为缓慢变化, 对比建筑物前后位移大小, 可判断其为粗差, 这在自适应阈值的结果中表现得更明显, 说明自适应阈值较好地保留了原始信号的特征; 而固定阈值存在过度去噪的问题。从评价指标上看, 自适应阈值信噪比和均方根误差指标最好。通过分析发现, 选用自适应阈值准则去噪效果更好, 并且保留了原始信号中存在的粗差。对 X、Y、Z 的 3 个方向观测数据做相同的处理, 三者获得的结果基本相同。可以发现, 在处理 GPS 高层建筑物动态观测数据时, 使用自适应阈值准则处理效果更好。

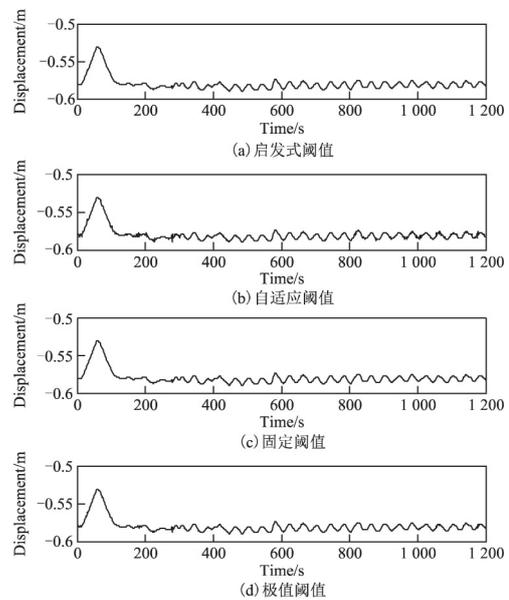


图 2 4 种阈值准则下去噪后信号

Fig 2 Using Four Threshold Criterion De-noising to Signal

表 1 4 种阈值去噪评价指标

Tab 1 Using Four Threshold Criterion De-noising Evaluation Indicator

阈值类型	THR	SNR	RMSE	R
启发式阈值	3.765 7	181.805 2	0.080 8	0.344 6
自适应阈值	0.593 3	185.028 7	0.068 8	1.952 9
固定阈值	3.765 7	181.766 7	0.080 9	0.344 6
极值阈值	2.264 5	182.625 1	0.077 5	0.344 6

2.3 分层与分段去噪

从图 2 中发现基于全局阈值的 4 种小波阈值去噪结果并不完善, 固定阈值存在过度去噪的情况,

自适应阈值虽然保留了存在的粗差, 但是去噪后信号平滑性不够。据此研究进行分阶段、分尺度提取信号特征。以 Z 方向观测信号为例, 首先研究全局去噪与分层去噪, 采用工程上广泛使用的 sym3 小波基, 选择 3 层分解尺度, 采用软阈值处理, 全局去噪选择效果好的默认阈值, 分层阈值使用 Birge-Massart 算法获取阈值。评价指标如表 2 所示, 去噪结果如图 3 所示。

表 2 全局阈值去噪与分层阈值去噪评价指标

Z 方向数据	THR	SNR	RMSE	R
全局阈值	0.009 9	181.610	0.081 6	0.345 4
分层阈值	0.007 1 0.006 5 0.003 4	182.071	0.079 7	0.345 4

从表 2 可以看出, 全局阈值比分层阈值大, 使全局阈值去噪后更光滑, 导致全局阈值存在过度去噪的可能, 使获得的变形信息失真。图 3 中 100~200 历元之间分层阈值去噪比全局阈值去噪呈现出了更多的变化信息, 且全局阈值去噪后没有显示 279 历元处的粗差, 可以发现分层阈值处理效果要好于全局阈值。实验中发现改变小波基和分解层数对去噪效果有较大的影响, 当分解尺度为 2、3、4 层时, 分层阈值去噪效果都要好于全局去噪, 当分解层数超过 5 层时就存在过度去噪的情况。可见, 分层阈值去噪中分解尺度是去噪效果好坏的关键因素。

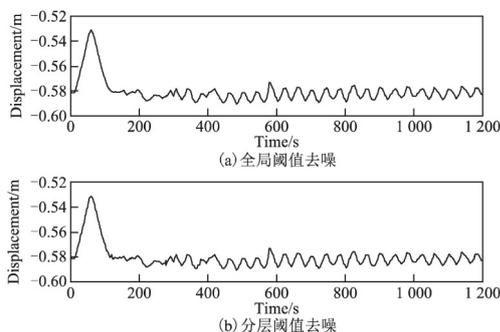


图 3 全局阈值去噪与分层阈值去噪结果
Fig 3 Global Threshold De-noising and Layered Threshold De-noising Results

观察图 1 中 Z 方向原始信号可以发现, 在前 100 历元信号表现为一较大正弦波动, 可以认为此时高层建筑物受到某强烈震动因素影响产生大振幅位移, 在 100~300 历元之间表现为平稳变化, 300 历元之后表现为周期正弦波动, 三者分别对应于第 1 段、第 2 段、第 3 段。3 段噪声大小不同,

第 1 段噪声影响较小, 第 2 段受噪声影响最严重, 根据对原始信号的初步分析, 将原始观测信号分为以上 3 段分别处理, 并采用去噪效果好的分层阈值去噪处理。第 1 段选用 sym5 小波基分 3 层去噪, 第 2 段选用 sym9 小波基分 3 层去噪, 第 3 段选用 sym4 小波基分 3 层去噪。分段去噪结果如图 4 所示, 各段选用阈值如表 3 所示。从图 4 中可以发现, 经分段处理后获得的信号特征更明显, 特别是第 2 段获得的 GPS 动态特性更丰富, 在历元 279 处的异常值更明显。

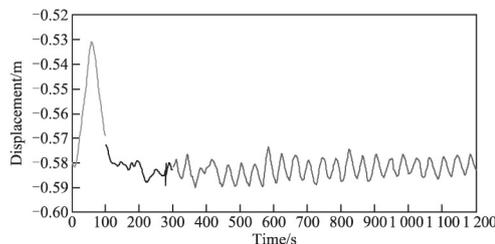


图 4 分段去噪结果图
Fig 4 Subsection De-noising Result

表 3 分段阈值

分段	THR		
第 1 段	0.004 2	0.007 2	0.004 5
第 2 段	0.005 8	0.007 0	0.007 5
第 3 段	0.007 0	0.005 5	0.003 0

在高层建筑物动态观测中, 受不同振动因素的影响, GPS 观测数据存在阶段性和差异性的简谐特性, 采用分段分层去噪并提取建筑物动态特性, 既满足了去噪要求, 又很好地保留了信号特征, 获得的变形信息更为全面。

2.4 小波包去噪

高层建筑物存在高频振动的情况, 在对观测信号处理时, 高频段可能存在有用信号, 同时采用小波包法和小波法对原始信号处理, 选择 db3 小波基, 做 3 层分解, 使用 wpdencmp 去噪, 去噪结果如图 5 所示, 评价指标如表 4。可以发现, 小波包去噪评价指标比小波去噪略好, 在图 5 中, 使用小波包法可以明显看到, 在 279 处的异常值。实验中发现, 改变小波基和分解层数对去噪效果有较大的影响, 在 db N、sym N、coif N 的 3 类小波基函数中, 随着阶数 N 的增加, 去噪后平滑度也增加, 信号逐渐变形失真, 随着分解尺度的增加也有同样的效果, 在工程应用中要根据实际需要选择。

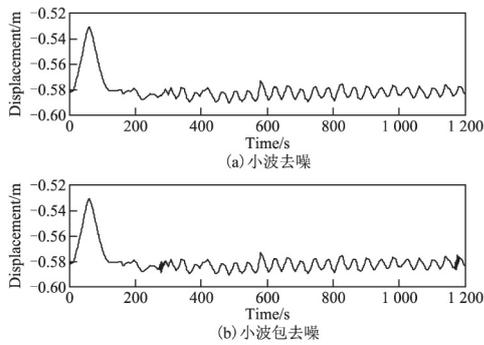


图 5 小波去噪与小波包去噪结果

Fig 5 Wavelet De-noising and Wavelet Packet De-noising Results

表 4 小波去噪与小波包去噪评价指标

Tab 4 Wavelet De-noising and Wavelet Packet De-noising Evaluation Indicator

去噪类型	SNR	RMSE	R
小波去噪	181.610 0	0.081 6	0.345 4
小波包去噪	181.917 5	0.080 3	0.345 4

3 结束语

以上实验表明, 4 种阈值去噪准则中, 自适应阈值准则在去噪的同时又能保留信号的特征信息, 更适用于高层建筑物动态数据处理。针对高层建筑物不同阶段振动幅度不同、噪声大小不同的特点, 采用分段处理、分层去噪的方法提取建筑物动态特性, 获得了较好的结果; 针对小波分析处理高层建筑物振动信息可能丢失高频信息的情况, 采用小波包去噪处理, 保留了更多的动态信息。分段处理存在的问题是如何合理选择分段点, 以及各段边缘的隔断问题, 这将是下一步研究的重点。

参考文献

[1] 罗志才, 陈永奇, 刘焱雄. GPS 用于监测高层建筑物动态特征的模拟研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 100-104. (LUO Zhicai, CHEN Yongqi, LIU Yanxiong. Application of GPS in the simulation study of dynamic characteristics of tall buildings[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(2): 100-104.)

[2] 姚丽慧, 高井祥, 王坚. 动态变形信号小波阈值降噪模型研究[J]. 测绘工程, 2011, 20(5): 18-21. (YAO Lihui, GAO Jingxiang, WANG Jian. New wavelet threshold noise reduction model of dynamic deformation signal [J]. Engineering of surveying and mapping, 2011, 20(5): 18-21.)

[3] 任超, 焦元元, 孙昌瑜, 等. 改进的软阈值法去噪效果分析[J]. 测绘科学, 2013, 38(1): 10-12. (REN Chao,

JIAO Yuanyaun, SUN Changyu, et al. Denoising analysis of improved soft threshold method[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(1): 10-12.)

[4] 王中元, 周天强, 张鹏飞. 高层建筑物 GPS 动态变形监测数据处理[J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 47-50, 37. (WANG Zhongyuan, ZHOU Tianqiang, ZHANG Pengfei. GPS dynamic deformation monitoring on high-rise buildings[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 47-50, 37)

[5] 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等. GPS 多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 36-41. (HUANG Dingfa, DING Xiaoli, CHEN Yongqi, et al. Wavelet filters based separation of GPS multi-path effects and engineering structure vibrations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 36-41.)

[6] 姚刚, 刘星, 郑求兴, 等. 高层建筑环境激励动态特性的 GPS 监测研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(5): 45-49. (YAO Gang, LIU Xing, ZHENG Qiuxing, et al. The research of dynamic characteristic with GPS under ambient excitation for high-rise building[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(5): 45-49.)

[7] 党星海, 赵丽洁, 孔令杰, 等. 小波分析在 GPS 振动监测数据中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 147-150. (DANG Xinghai, ZHAO Lijie, KONG Lingjie, et al. Application of wavelet analysis in GPS dynamic deformation data processing [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2): 147-150.)

[8] 田磊. 基于小波函数对 GNSS 监测数据降噪的应用研究[J]. 全球定位系统, 2015, 40(4): 88-90. (TIAN Lei. Application of wavelet function for GNSS-based noise monitoring data [J]. GNSS World of China, 2015, 40(4): 88-90.)

[9] 吴继忠. GPS 观测数据的小波阈值法消噪[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 79-82, 87. (WU Jizhong. De-noising of GPS observations with wavelet threshold method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(4): 79-82, 87.)

[10] 于波, 翟国君, 刘雁春, 等. 基于小波阈值的海洋磁力测量数据消噪方法[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 89-91. (YU Bo, ZHAI Guojun, LIU Yanchun, et al. Data denoising based on wavelet threshold in marine magnetic survey [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5): 89-91.)

[11] 任超, 沙磊, 卢献健. 一种改进小波阈值算法的变形监测数据滤波方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(7): 873-875. (REN Chao, SHA Lei, LU Xianjian. An adaptive wavelet thresholding de-noising for deformation analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(7): 873-875.)

(下转第 108 页)

参考文献

- [1] 柴根象,洪圣岩.半参数回归模型[M].合肥:安徽教育出版社,1995.(CHAI Genxiang,HONG Shengyan.Semiparameter regression model[M].Hefei:Anhui Education Press,1995.)
- [2] GREEN P J,SILVERMAN B W. Nonparametric regression and generalized linear models[M]. London: Chapman & Hall,1994.
- [3] 胡宏昌,孙海燕.正规矩阵 R 及平滑因子 α 的选取[J].测绘工程,2003,12(4):5-8.(HU Hongchang,SUN Haiyan.Choice of the regular matrix R and smoothing parameter α [J].Engineering of Surveying and Mapping,2003,12(4):5-8.)
- [4] 丁士俊,朱留洋,姜卫平.一种计算补偿最小二乘正则化参数的最优方法[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1):115-117,125.(DING Shijun,ZHU Liuyang,JIANG Weiping. Penalized least squares estimator for non-linear models [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2015,35(1):115-117,125.)
- [5] 王振杰,欧吉坤,曲国庆,等.用 L -曲线法确定半参数模型中的平滑因子[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(7):651-653.(WANG Zhenjie,OU Jikun,QU Guoqing,et al. Determining the smoothing parameter in semi-parametric model using L -curve method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2004,29(7):651-653.)
- [6] 陶肖静,朱建军,田玉森.半参数模型中影响正则化参数的因素分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(3):298-301.(TAO Xiaojing,ZHU Jianjun,TIAN Yumiao. Analysis of factors influencing smoothing parameter in semiparametric model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2012,37(3):298-301.)
- [7] 胡宏昌.半参数回归模型的泛补偿最小二乘估计[J].工程数学学报,2005,22(3):487-492.(HU Hongchang. Universal penalized least squares estimation for semiparametric regression models[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics,2005,22(3):487-492.)
- [8] HANSEN P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L -curve[J]. Siam Review,1992,34(4):561-580.
- [9] MORITZ H. Advanced physical geodesy[M]. 2nd ed. Karl Sruhe:Abacus Press,1989.
- [10] 邱卫宁,陶本藻,姚宜斌,等.测量数据处理理论与方法[M].武汉:武汉大学出版社,2008.(QIU Weining,TAO Benzao,YAO Yibin,et al. The theory and method of surveying data processing[M]. Wuhan:Wuhan University Press,2008.)
- [11] 朱建军,冯光财,戴吾蛟.半参数模型的一种虚拟观测解法[J].工程勘察,2006(9):54-57.(ZHU Jianjun,FENG Guangcai,DAI Wujiao. A quasi observation approach for semi-parametric regression [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2006(9):54-57.)

(责任编辑:路素军)

(上接第 104 页)

- [12] 唐进元,陈维涛,陈思雨,等.一种新的小波阈值函数及其在振动信号去噪分析中的应用[J].振动与冲击,2009,28(7):118-121,217.(TANG Jinyuan,CHEN Weitao,CHEN Siyu,et al. Wavelet-based vibration signal denoising with a new adaptive thresholding function[J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(7):118-121,217.)
- [13] 王旭,刘文生,王昶.一种改进小波阈值去噪方法的研究[J].测绘科学,2011,36(5):179-180,242.(WANG Xu,LIU Wensheng,WANG Chang. An improved wavelet threshold de-noising method[J]. Science of Surveying and Mapping,2011,36(5):179-180,242.)
- [14] 章浙涛,朱建军,匡翠林,等.小波包多阈值去噪法及其在形变分析中的应用[J].测绘学报,2014,43(1):13-20.(ZHANG Zhetao,ZHU Jianjun,KUANG Cuilin,et al. Multi-threshold wavelet packet de-noising method and its application in deformation analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2014,43(1):13-20.)
- [15] 刘文艺,汤宝平,蒋永华.一种自适应小波消噪方法[J].振动,测试与诊断,2011,31(1):74-77,130.(LIU Wenyi,TANG Baoping,JIANG Yonghua. Research on an adaptive wavelet denoising method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2011,31(1):74-77,130.)

(责任编辑:路素军)