

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.037

特征点压缩算法在分布式光纤桩基检测中的应用

苗鹏勇, 王宝军, 施 斌, 张其琪

(南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 布里渊散射光时域反射测量技术 (BOTDR/A) 是一种重要的分布式光纤感测技术。采用 BOTDR/A 技术进行分布式光纤桩基检测时, 海量的检测数据需要平滑去噪。介绍了分布式光纤桩基检测中最常用的感测光纤铺设工艺、海量检测数据的特点、平滑去噪在检测数据处理分析方面的作用, 并据此提出了特征点压缩算法 (一种新的平滑去噪方法) 的概念和实现流程; 结合工程实测数据, 分析了该法的平滑去噪效果, 验证了该法的实际应用情况。研究结果表明: 该方法用于桩基检测数据处理是十分有效的, 与常规算法对比, 该方法简单高效, 能够在不丢失检测数据特征趋势的同时对数据进行较好的平滑去噪, 实际应用达到了满意的效果, 其结果可在分布式光纤桩基检测的数据处理中推广应用。

关 键 词: 桩基; 分布式光纤检测; 特征点压缩算法; 数据平滑去噪

中图分类号: TU 473.1+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 03-0911-08

Application of feature point compression algorithm to pile foundation detection using distributed optical fiber

MIAO Peng-yong, WANG Bao-jun, SHI Bin, ZHANG Qi-qi

(School of Earth and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract: Brillouin optical time domain reflectometer/analysis (BOTDR/A) is one kind of important distributed optical fiber sensing technology. Using the BOTDR/A-based distributed optical fiber technology to detect deformation of pile foundation, the vast amounts of detection data need smoothing and denoising. The paper introduces most frequently used embedded techniques of the sensing optical fiber, the characteristics of detection data, the role of massive data smoothing and denoising on the detection data handle and analysis. We developed the concept and proposed the implementation process of the feature point compression algorithm (a new smoothing and denoising method). Based on data measured from practical engineering, the smoothing and denoising effect of the method is analyzed, and its applicability is also verified. The results show that the proposed method is simple and efficient in processing the data from pile foundation detection, compared with the conventional algorithm, it can smooth and denoise data without losing the characteristics trend of detected data, and can achieve satisfactory results as expected. It can be applied to the distributed data processing of optical fiber pile foundation detection.

Keywords: pile foundation; distributed optical fiber detection; feature point compression algorithm; data smoothing and denoising

1 引 言

随着光纤感测技术的日臻完善, 分布式光纤检测与监测技术因其分布式、长距离、抗电磁干扰、耐久性好等优点, 已成功广泛应用于边坡^[1]、隧道^[2]、桥梁^[3]、桩基^[4-8]等岩土领域的检测与监测中。分布式光纤感测技术中, 感测光纤既是传感器也是

传输介质, 会产生海量的检测与监测数据^[9], 同时也会在海量的数据中掺杂不同程度的噪声, 既有周期性噪声, 也有不规则的随机噪声。因此, 在对检测与监测数据分析处理之前, 需要对其去噪处理^[10]。在当前岩土工程领域, 专门研究分布式光纤数据处理的学者较少。在实际应用中, 有部分学者的研究在该方面有所涉及。朱国甫等^[11]使用约束样

收稿日期: 2016-05-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.41230636); 国家重大科研仪器研制项目 (No.41427801) 国土资源部公益性行业科研专项 (No.201511055-2)。This work was supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (41230636), the Development Projects of National Major Scientific Research Instrument of China (41427801) and the Research Projects of Ministry of Land and Resources for the Public Welfare Industry in China (201511055-2).

第一作者简介: 苗鹏勇, 男, 1990 年生, 硕士, 主要从事岩土工程光纤监测与后期数据处理分析研究工作。E-mail: mpy_nju@foxmail.com

通讯作者: 王宝军, 男, 1973 年生, 教授, 博导, 主要从事地质工程中的信息技术研究工作。E-mail: baojun@nju.edu.cn

条拟合对测桩数据处理;徐洪钟等^[10]使用了小波分析对 BOTDR 光纤传感器信号进行了处理;岳建平等^[12]使用多小波对分布式光纤温度传感器检测数据做了处理;朴春德等^[4]使用小波分析和移动平均法对分布式光纤传感器钻孔灌注桩检测数据做了处理;朱友群等^[13]采用线性滤波器和多项式拟合方法对 FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验数据做了平滑去噪处理。

在采用布里渊散射光时域反射测量技术 (BOTDR/A) 进行桩基分布式检测时,感测光纤埋设在桩身,往往采用对称铺设。这时如果桩身偏心受压或不均匀受力,会导致桩身应力的集中。同时在数据噪声影响下,会使检测数据不平滑,不利于桩身两侧检测数据的匹配,影响后期数据的分析。因此,科学合理的数据平滑去噪处理十分重要。

虽然上述各方法都能够在一定程度上对分布式光纤桩基检测数据进行平滑去噪,但各方法对桩基检测数据的处理针对性差,另外有些方法过度繁琐,不能对桩基检测数据进行简便合理的平滑处理。

本文针对基于布里渊散射光时域反射测量技术 (BOTDR/A) 的桩基分布式光纤铺设特点,提出了一种特征点压缩算法。结合工程实测数据,分析并验证了特征点压缩算法平滑去噪的效果和实际应用情况。

2 桩基检测感测光纤的埋设工艺

在采用布里渊散射光时域反射测量技术 (BOTDR/A) 进行桩基分布式检测中,感测光纤铺设好坏直接影响到桩的检测结果。为取得最佳的检

测效果,感测光纤的布设要沿着桩侧进行竖直铺设。根据现有工法,确保感测光纤的成活率和数据的可靠性,感测光纤通常呈 U 字形对称布设^[4-5],见图 1。因此,桩基检测数据整体上也具有对称性(见图 2)。然而,桩在载荷试验中常发生偏心荷载压缩^[8];桩身质量不均匀和桩-土作用常导致桩身应力集中和两侧应变分布不均匀^[14]。这些因素使得两侧感测光纤测到的局部桩身应变分布不均匀对称,见图 2。因此,在桩基分布式光纤检测中,后期数据处理往往需要根据检测数据的特征位置(比如桩头)来匹配两侧数据的对应位置。所以,两侧数据需要平滑去噪处理以减少检测误差,提高桩的轴力和侧摩阻力的计算精度。数据平滑去噪处理的方法很多,如果应用不当,可能造成特征数据的消失,会使得检测误差增大。综上所述,本文针对基于 (BOTDR/A) 的桩基分布式检测数据特点,提出了一种特征点压缩算法。

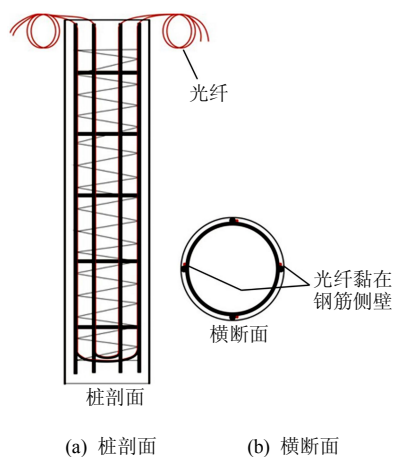


图 1 光纤埋设工艺

Fig.1 Installation of sensing optical fiber

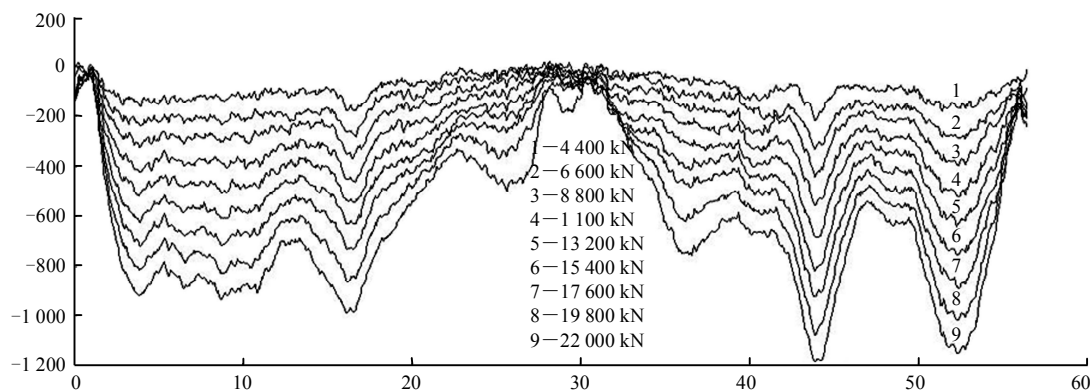


图 2 分布式光纤桩基检测数据

Fig.2 Detected data of pile foundation by distributed optical fiber

3 特征点压缩算法

特征点是指检测数据曲线中具有明显转折的应

变点。特征点压缩算法是指在检测数据曲线中查找特征点的方法。该算法思想是:每次顺序取曲线上的两点连线,计算两点间所有点到该直线的最大垂

线距离 l , 并与阈值 Δ 比较。若 $l < \Delta$, 则去掉中间所有点; 若 $l \geq \Delta$, 则保留最大垂线距离点并以该点为新的曲线分割点。然后取下段数据继续处理, 直到这条线结束 (见图 3, 图中 f_i 为第 i 次迭代两个特征点得到的直线, T_i 为第 i 次迭代最大垂距对应的位置点), 在实际应用中, 作者通过计算机编程实现了该流程。

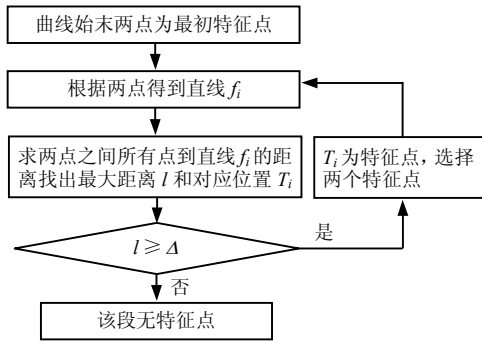


图3 压缩算法查找特征点流程图

Fig.3 Flow chart of using feature point compression algorithm to find feature points

假设图 4 为光纤检测数据谱, 现根据图 4 对特征点压缩算法的原理介绍如下:

(1) 首先确定判断阈值 Δ , 并将检测数据曲线两端 A 、 B 作为最初特征点, 得到直线 f_1 (见图 4(a));

(2) 计算 A 、 B 间各检测点到直线 f_1 的垂线距离 (见图 4(b));

(3) 选取距离最大值 l 和对应点 C , 因为 $l \geq \Delta$, 所以 C 作为新的特征点 (见图 4(c)), 并以 C 点分割数据段, 进入下一循环;

(4) 由 A 、 C 两点得到直线 f_2 , 由 B 、 C 两点得到直线 f_3 . 求 A 、 C 两点间所有点到 f_2 的垂线距离, 找出最大垂线距离后判断找到特征点 D , BC 间所有点到 f_3 垂线距离都小于给定阈值, BC 间无特征点, 所以 BC 段不再进行查找 (见图 4(d));

(5) 由 A 、 D 两点得到直线 f_4 , 由 D 、 C 两点得到直线 f_5 . 求 D 、 C 两点间所有点到 f_5 的垂线距离, 找出最大垂线距离后判断找到特征点 E , AD 间所有点到直线距离都小于给定阈值, AD 间无特征点 (图 4(e));

(6) AD 、 DE 、 EC 、 CB 间所有点到直线距离都小于给定阈值, 无特征点, 循环结束。点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 为该段曲线的特征点 (图 4(f))。

压缩算法取到若干个特征点后, 需要对特征点之间的数据进行平滑处理, 本文选用最小二乘法^[15-16]对每两个特征点之间的数据进行平滑去噪。

为查找最好的拟合曲线, 本文分别用 1 次、2 次、3 次曲线做最小二乘法拟合。特征点间数据拟合处理后可能会造成特征点位置出现不平滑。为此, 特征点间数据拟合过后, 在特征点位置选择很小的参考点范围值用平均值法进行处理, 使特征点位置平滑。

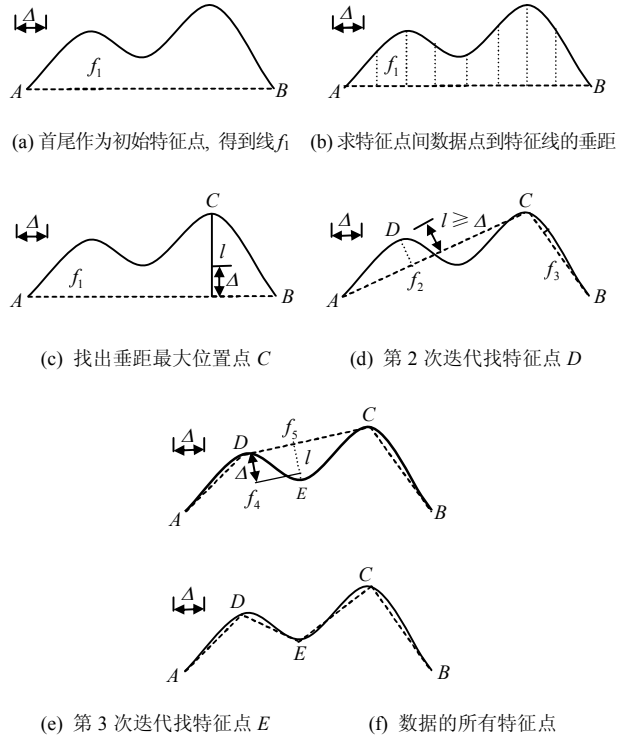


图4 特征点压缩算法原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of feature point compression algorithm

4 对比分析与效果评估

4.1 参数的选择

为了更好地获得平滑去噪效果, 本文以均方误差 (MSE)、信噪比 (SNR) 和平滑度 (r) 作为理论衡量标准, 判定当前常用的小波分析、均值、中值法及特征点法在不同参数值下的平滑去噪效果。均方误差、信噪比是关注数据细节信息的物理量, 描述了去噪数据细节上的差异; 而平滑度是关注数据逼近信息的物理量, 描述了去噪数据的整体趋势特征。对同一数据, 经过平滑去噪后均方误差越小, 信噪比越大, 平滑度越小, 那么平滑去噪效果也就越好^[15-16]。

均方误差的定义为

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \hat{x}(i)]^2} \quad (1)$$

信噪比的定义为

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [x(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [x(i) - \hat{x}(i)]^2} \right\} (dB) \quad (2)$$

平滑度定义为

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\hat{x}(i+1) - \hat{x}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [x(i+1) - x(i)]^2}} \quad (3)$$

式中: N 为数据点数; dB 表示损耗; $x(i)$ 和 $\hat{x}(i)$ 分别为原始数据和经过处理的数据。

对参考点范围值、特征点阈值及小波分析的分

解层数等参数分别取 5 个不同值。对上述各级荷载下的检测数据分别计算上述 3 项指标, 然后取平均

值, 所得成果如图 5 所示。图中所示, 对几种平滑方法, 参考点范围值、压缩算法的特征点阈值和小波变换分解层数都会对数据的去噪产生影响。图示表明, 随着参数值取值增大, 信噪比逐渐减小、均方误差逐渐增大, 平滑度逐渐减小。这表明, 上述参数值取值小时, 各方法对检测数据的平滑去噪效果不明显, 不能达到实际所需满意要求, 随着参数值的增大, 去噪平滑效果越明显, 但该值过大, 又可能导致数据的关键信息丢失, 并且会增加计算量。因此, 应根据实际情况选取合适的参数值, 具体值应该根据具体的数据而定。

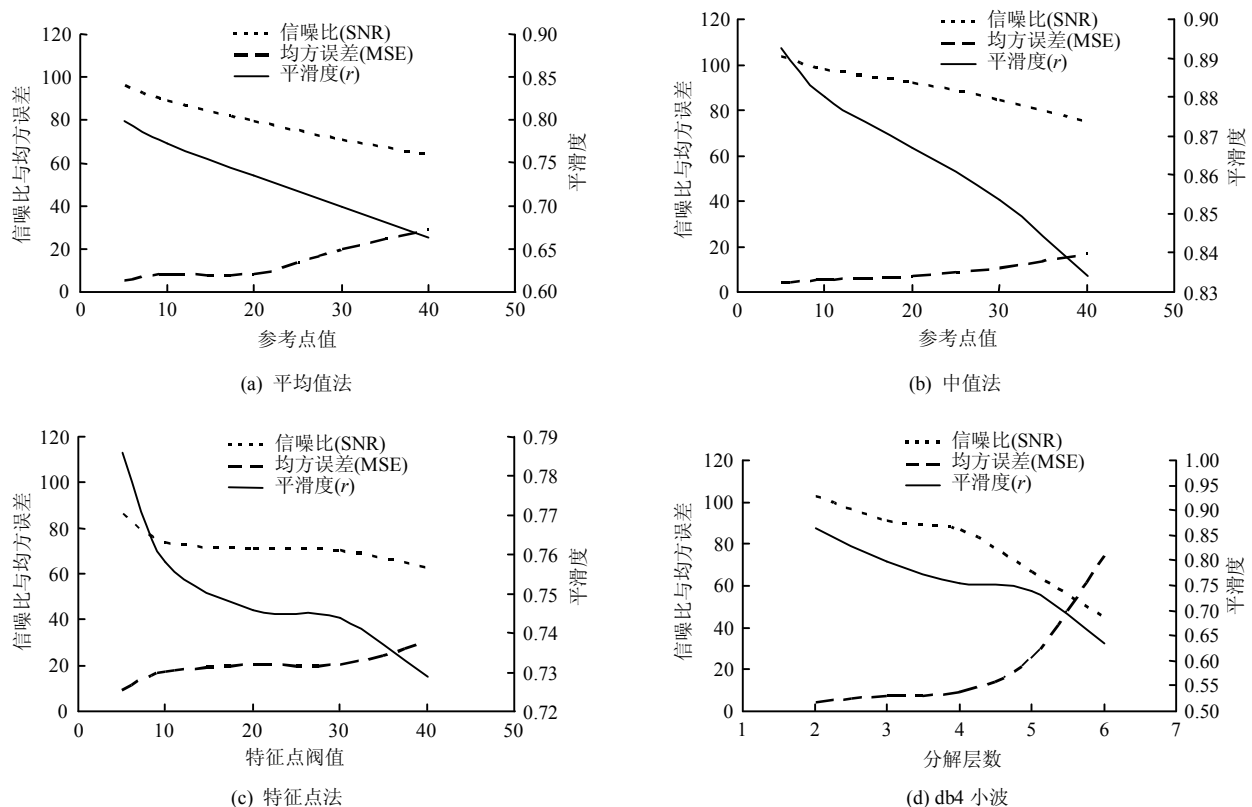


图 5 信噪比、均方误差和平滑度随参数值变化图
Fig.5 Changes of SNR, MSE and r with parameter values

4.2 对比分析

桩基检测中随着荷载的增大, 桩身的应变也会相应的增大, 反映到检测数据中噪声信号的影响会减小, 平滑去噪时对方法的要求会提高。所以为了更好地判断特征点法的平滑去噪性能, 选取桩顶荷载为 22 000 kN 的检测数据进行去噪对比分析。为了对比分析上述各平滑去噪方法, 根据图 5, 兼顾计算效率与平滑去噪效果, 本文分别采用压缩算法(阈值 25)、均值法(参考点范围 20)、中值法(参考点

范围 20) 和小波分析(db4 小波, 分解层数 4, 阈值为软阈值, 自适应阈值选用启发式阈值), 对上述桩基检测数据进行平滑去噪处理。各方法处理效果见图 6。

数据平滑去噪的效果评估方法可分为定性法与定量法两种。定性法是指由人眼直接观察数据去噪效果, 其优点在于可直观地辨识数据在平滑去噪等方面的差异, 缺点是只能用于判别得到明显改善的

部位、精确度不高、无法用于参数优化。而定量法可以弥补上述定性评估指标的不足, 两者可结合起来对平滑去噪效果进行评估。下面从定性和定量两

方面对平滑去噪效果进行评估。

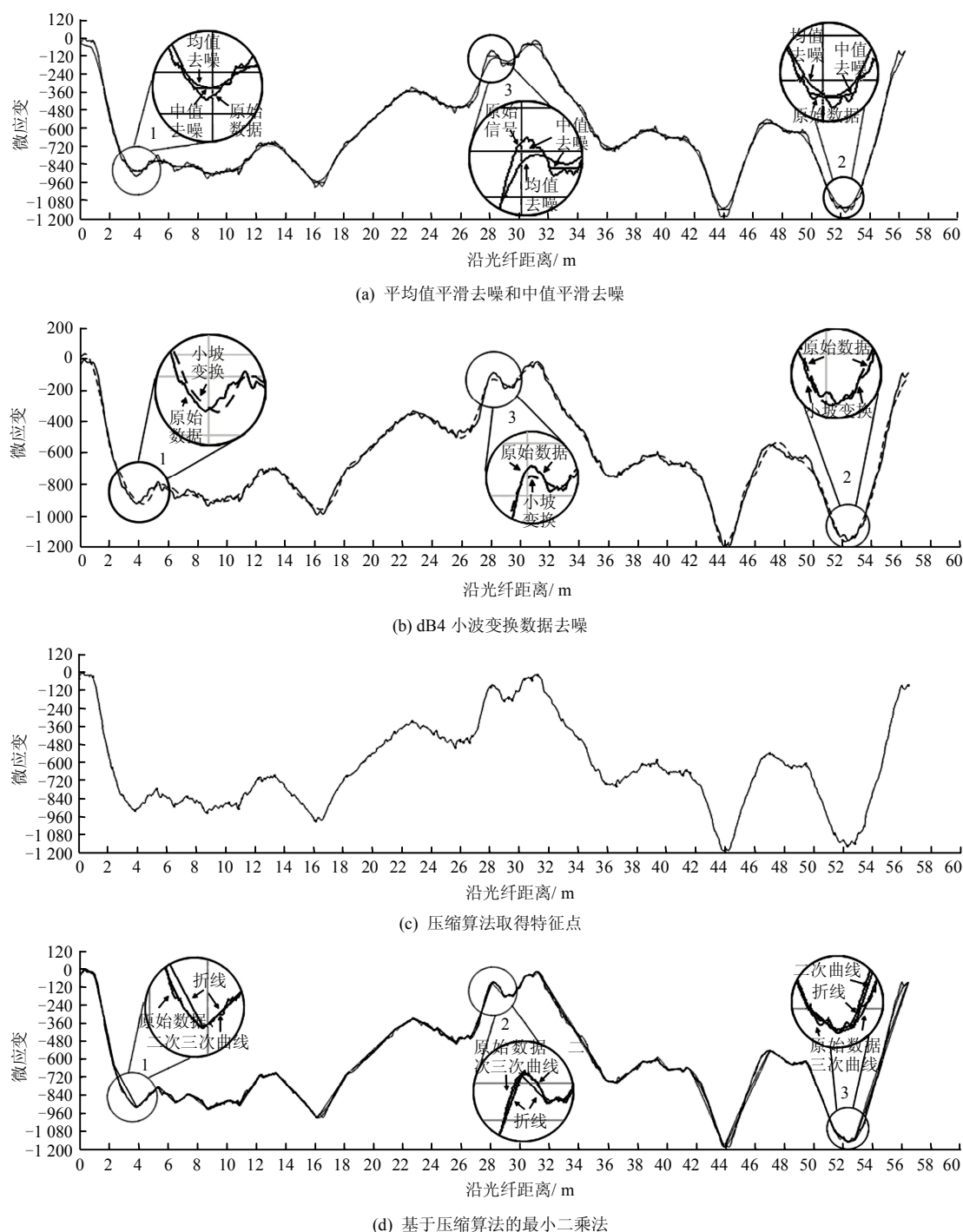


图6 特征点压缩算法平滑去噪效果对比图

Fig.6 Comparisons of effect of data smoothing and denoising using feature point compression algorithm

4.2.1 定性分析

为了分析各种方法的平滑去噪效果, 同时观察去噪效果是否影响桩两侧数据的匹配, 在图6中选择了1、2、3这3个位置。由于测桩时光纤传感器为U型布设(见图1), 所以上述位置对应到光纤传感器上正好是桩顶和桩底的位置, 1、3位置对应桩

顶, 2位置对应桩底。

平均值法对于幅值较大的应变数据进行了削弱, 在图像上表现为数据凹凸点发生弱化, 使得曲线的凹凸变换趋势减小。而中值法会使两个相对平缓数据段之间产生阶跃, 如果两段平缓数据段之间的凹凸是偶然因素引起的脉冲, 那么这种阶跃式处

理便可以有效的平滑去噪；但如果这种凹凸变化本就是数据的特征趋势，那么这种处理将对数据造成比较大的损伤。从图中可以看到：两种方法对 3 个位置之间的数据平缓段都进行了很好的平滑去噪，见图 6(a)。

相比于前两种方法，小波分析在 3 个位置的处理效果更优，平缓数据段都得到了很好平滑去噪。但在细节部分（如位置 1、3），小波变换处理后效果并不理想，这会对桩两侧数据匹配造成比较大的影响，见图 6(b)。另外小波分析参数较多，设置较为复杂，对一般人员掌握起来比较困难。

用特征点压缩算法取得的特征点都位于检测数据曲线中具有明显转折的位置，说明压缩算法能够取到反映当前数据整体特征趋势的位置点，见图 6(c)。取得特征点后，分别用 1 次、2 次、3 次曲线对两个特征点之间的数据进行最小二乘法拟合，处理效果见图 6(d)。图中 3 种曲线在比较平缓的数据段重合较好，证明在平缓数据段 3 种曲线平滑去噪效果都比较好。对位置 1、2、3 来说，2 次和 3 次的去噪效果明显更优。从位置 3 可以看出来，3 次曲线平滑去噪效果最好。总体来说，相比上述 3 种平滑去噪方法，特征点压缩算法能够保持数据的特征趋势并对数据进行较好的平滑处理。

4.2.2 定量分析

表 1 是 3.2.1 小节选定参数下，用上述几种方法处理后根据式 (1)~(3) 计算得到的均方误差、信噪比和平滑度。

从反映数据细节的信噪比和均方误差两项参数来看，压缩算法 (3 次) 和中值法最优，压缩算法 (2 次) 次之，其他方法相差不大。这是因为检测数据中，噪声在原数据信号中所占比例较小，所以中值法能够对数据进行比较好的平滑去噪；压缩算法 (3 次) 整

体上对数据比较吻合；压缩算法 (2 次) 虽整体吻合，但吻合度差于 3 次曲线；其他方法去噪较大且各自相差不大，这可能会丢失关键数据信息。

表 1 几种方法数据去噪效果指标参数

Table 1 Comparison of effect of data smoothing and denoising by different methods

去噪方法	信噪比(SNR/dB)	均方误差(MSE)	平滑度(r)
平均值方法	68.797 6	6.204 8	0.721 2
中值方法	84.483 5	2.135 2	0.869 8
压缩算法(1 次)	64.663 6	6.303 8	0.698 9
压缩算法(2 次)	67.600 6	4.574 4	0.692 6
压缩算法(3 次)	80.858 7	2.149 1	0.759 0
小波变换(db4)	67.600 6	4.574 4	0.749 8

从反映数据整体特征的平滑度参数来看，压缩算法 (1 次和 2 次) 最好，中值法最差，其他方法在两者之间。这主要是压缩算法 (2 次和 1 次) 在应用的过程中，为了保持曲线的平滑，舍去了比较多的信息，这从前两项参数便可反映出。而中值法在两段比较平缓的数据段之间的拐点会出现阶跃性变化，直接影响了曲线平滑。其他方法则在去噪的同时兼顾了曲线平滑度。

结合上述两方面，压缩算法 (2 次与 3 次) 在数据平滑去噪方面具有比较好的效果，但两种方法的侧重点不同，前者侧重于在特征点的约束下对数据平滑，后者侧重于在特征点约束下进行去噪。

4.3 实际应用效果

用特征点压缩算法对上述桩基检测数据平滑去噪，处理计算^[5]得出的轴力值和摩阻力图分布形态如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出，桩身轴力随着桩身向下逐渐缓慢的减小，没有出现大的起伏，这说明该桩的成桩质量好，且经过左、右两侧检测数据平均，有效地避免了偏心荷载的影响。从图 7(b)

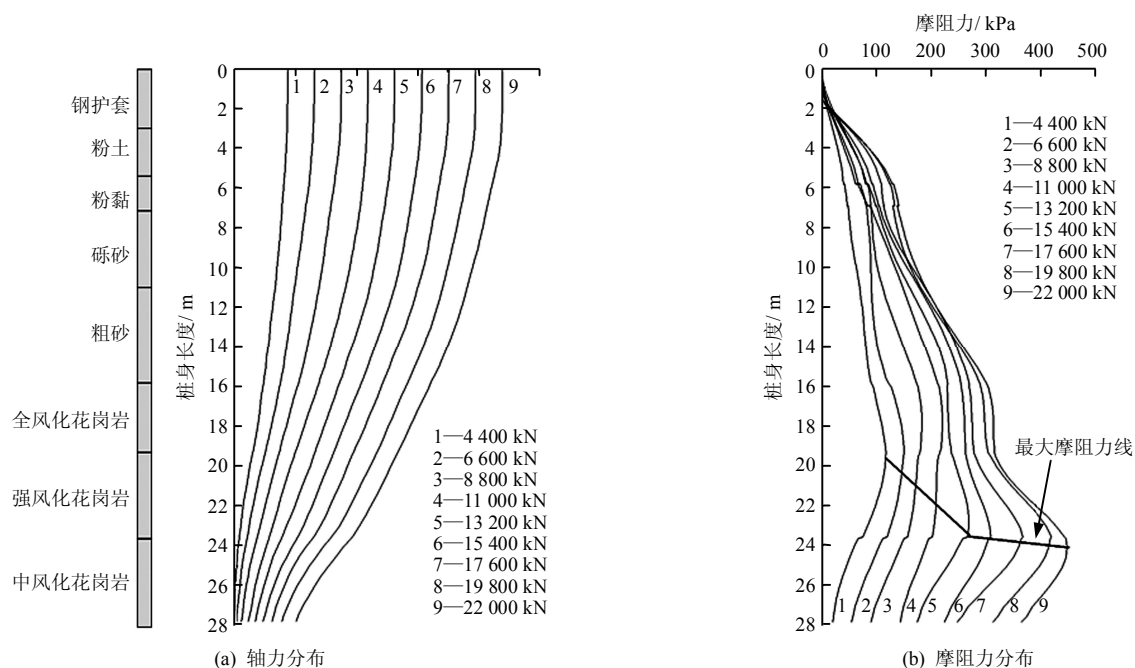


图7 轴力图与摩阻力图
Fig.7 Diagrams of axial force and frictional resistance

中可以看出, 同一荷载下桩身从上到下摩阻力整体上呈先增大后减小的趋势, 局部会出现不同。不同荷载下相同桩身处的摩阻力随荷载的增大而增大, 这是由于随着荷载的增大, 相同桩身处相对位移增大造成的, 最大摩阻力出现的位置, 随着荷载的增大向下移动, 且都出现在花岗岩地层区域。由于上部桩身变形大, 上部土层侧摩阻力发挥完全, 下部土体位移相对较小, 其侧摩阻力仍有发挥空间。综上所述, 处理后的实际效果与规范要求^[17]及桩身荷载下传力机制^[18]相吻合, 能够反映桩体在荷载作用下的真实受力情况。

5 结 论

(1) 压缩算法在能够保留检测数据特征趋势的同时进行平滑去噪, 并从一定程度上改善数据的信噪比, 对分布式光纤桩基检测数据平滑去噪及实际应用能够得到满意的效果。

(2) 相比于均值、中值法、小波分析, 压缩算法简单且易实现, 能够较好地获取数据的特征信息, 并能够对数据进行有效的平滑去噪。

(3) 压缩算法对检测数据去噪会受去噪参数的影响, 因此, 根据不同数据与处理要求选择合适的参数会使数据的平滑去噪有更好的效果, 另外, 压缩算法在其他岩土与地质工程领域分布式光纤检测与监测应用方面的适用性还有待检验。

参 考 文 献

- [1] 王宝军, 李科, 施斌, 等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 325—332.
WANG Bao-jun, LI Ke, SHI Bin, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3): 325—332.
- [2] 施斌, 徐学军, 王镭, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622—2628.
SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Di, et al. Study on BOTDR distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2622—2628.
- [3] 高俊启, 施斌, 张巍, 等. 分布式光纤传感器用于桥梁和路面的健康监测[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 14—19.
GAO Jun-qi, SHI Bin, ZHANG Wei, et al. Application of distributed fiber optic sensor to bridge and pavement health monitoring[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(1): 14—19.
- [4] 朴春德, 施斌, 魏广庆, 等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976—981.
PIAO Chun-de, SHI Bin, WEI Guang-qing, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 976—981.
- [5] 魏广庆, 施斌, 贾建勋, 等. 分布式光纤传感技术在预

- 制桩基桩内力测试中的应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 911—916.
- WEI Guang-qing, SHI Bin, JIA Jian-xun, et al. Application of distributed optical fiber sensing to testing inner force of prefabricated piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(6): 911—916.
- [6] 刘晶晶, 李丛. 分布式光纤在桩基静载试验中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, (增刊 1): 73—76.
- LIU Jing-jing, LI Cong. Application of distributed fibre-optical in static test[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2010, (Supp.1): 73—76.
- [7] LU Y, SHI B, WEI G Q, et al. Application of a distributed optical fiber sensing technique in monitoring the stress of precast piles[J]. **Smart Materials & Structures**, 2012, 21(11): 115011—115019(9).
- [8] 罗勇, 李春峰, 邢皓枫. 基于分布式光纤测试技术的大直径嵌岩桩承载性能研究[J]. 岩土力学, 2014, (5): 1406—1412.
- LUO Yong, LI Chun-feng, XING Hao-feng. Research on bearing behaviors of large-diameter rock-socketed piles through distributed optical fiber sensing technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, (5): 1406—1412.
- [9] 马水山, 王志旺, 李端有, 等. 光纤传感器及其在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1692—1694.
- MA Shui-shan, WANG Zhi-wang, LI Duan-you, et al. Optical fiber sensors and their application to geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.1): 1692—1694.
- [10] 徐洪钟, 施斌, 张丹, 等. 基于小波分析的 BOTDR 光纤传感器信号处理方法[J]. 光电子·激光, 2003, 14(7): 737—740.
- XU Hong-zhong, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Signal processing of the fiber optic BOTDR sensor based on wavelet analysis[J]. **Journal of Optoelectronics • Laser**, 2003, 14(7): 737—740.

下转第 924 页