



## 一种地铁轨道相对变形检测与定位方法

梅文胜, 吕世望, 于安斌, 张鹏, 王涛

引用本文:

梅文胜, 吕世望, 于安斌, 等. 一种地铁轨道相对变形检测与定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(1): 104–110.

MEI Wensheng, LÜ Shiwang, YU Anbin, et al. [Detecting and Locating Method for Subway Track Relative Deformation](#)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 104–110.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [基于改进VMD的变形特征提取与分析](#)

Deformation Feature Extraction and Analysis Based on Improved Variational Mode Decomposition

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 612–619 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180286>

### [融合多棱镜式雷达/IMU/RTK的轨道车辆高精度实时定位与建图](#)

Real Time Localization and Mapping Integrating Multiple Prism LiDARs/IMU/RTK on Railway Locomotive

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1802–1807 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210478>

### [固定模糊度的GLONASS卫星超快速轨道确定](#)

Ultra-rapid Orbit Determination of GLONASS Satellite After Ambiguity is Fixed

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1932–1940 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210260>

### [联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布](#)

Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1677–1685 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210061>

### [基于ICEEMD-ICA与MDP准则的变形监测数据去噪方法](#)

Denoising Method for Deformation Monitoring Data Based on ICEEMD-ICA and MDP Principle

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1658–1665 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190174>



# 一种地铁轨道相对变形检测与定位方法

梅文胜<sup>1</sup> 吕世望<sup>1</sup> 于安斌<sup>1</sup> 张 鹏<sup>1</sup> 王 涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘 要:**利用三维激光扫描所得点云数据识别并提取轨道高程,引入轨道不平顺的研究方法,定义了用于描述不同期之间轨道局部相对位置关系的线状结构局部相对变形波动性指标,提出了基于小波分解和平滑伪维格纳-威尔分布的异常局部相对变形提取方法。小波分解具有放大轨道相对变形特征和缩小频段范围的作用,可确定异常局部相对变形的波长。维格纳-威尔分布能够将信号能量在时-频两域中展开,可分析信号在特定频率下能量的分布,从而确定异常局部相对变形的的位置。使用模拟数据验证算法的可行性,并进行了实例分析,结果表明,运用小波分解和维格纳-威尔分布处理地铁隧道三维激光扫描点云中提取的轨道数据,能够从时-频两域分析轨道变形的能量分布,有效地提取出轨道相对变形的相关信息,为轨道相对变形检测提供了一种新的方法。

**关键词:**三维激光扫描;轨道相对变形;小波变换;维格纳-威尔分布

**中图分类号:**P258;U231

**文献标志码:**A

三维激光扫描是一种重要的隧道测量手段,具有效率高、数据量大、精度高等优点。对于扫描所得点云的计算与处理,如何通过点云数据来体现隧道的变化,已有许多学者进行相关的研究。刘燕萍等<sup>[1]</sup>使用了站扫方式提取出断面的圆心和半径,计算出隧道的收敛变形情况和预估变化趋势。刘绍堂等<sup>[2]</sup>提出了用基于三维激光扫描技术的多点整体监测方法,引入了椭圆拟合法描述隧道的整体变形。陈勇<sup>[3]</sup>通过分析野外轨道点云数据,重构了既有线曲线参数,对现有轨道进行了整正计算。许磊等<sup>[4]</sup>提出了一种基于射线相交的隧道断面自动测量方法,满足多种结构类型的隧道断面测量要求。王令文等<sup>[5]</sup>通过采用全站仪对点云数据进行绝对定位来提高拼接精度,以设计轴线为基准提取隧道断面,分析了隧道的断面收敛情况。

隧道三维激光扫描变形测量大多用于计算隧道直径收敛,研究隧道内壁断面形状是否发生了变形<sup>[6]</sup>,未见用此方法测量分析轨道的变形。地铁点云数据密度大、精度高,可提取任意里程处轨道面的几何信息,本文利用隧道扫描点云提取出的轨道面高程数据,给出了局部相对变形波动值的概念,提出了一种基于小波变换和维格纳-威尔

分布的变形提取方法,结合理论分析、模拟数据和实例计算验证了该方法的有效性与可行性。

## 1 线状结构局部相对变形波动指标

线状结构的地铁变形通常采用周期性重复观测的方法,获取特征处的多期坐标,求取周期期间的变形量,以期掌握地铁结构的整体变形情况。由于地铁隧道内基准的建立和维护困难,作业效率低下,掌握地铁全线隧道变形的代价很高,受地铁隧道线状分布的影响,其横向和垂向传递误差较大,绝对精度较低。从线状横向和垂向变形对隧道结构的危害程度来看,分布在长区段相对变化平缓的变形,即使累积变形量较大,结构损伤的可能性也较小;而局部较为剧烈的相对变形对线状地铁结构的影响更大,因此,对多期测量成果在局部的相对变形进行分析和研究更有实际意义。

为提取两期测量成果中隐含的线状结构相对波动信息,本文参考了高铁轨道不平顺性检测原理与方法<sup>[7]</sup>,定义了线状结构局部相对变形波动性指标,如图1所示,实线为首次测量成果,虚线为第 $k$ 次测量成果, $2s$ 为检测弦长。

收稿日期:2020-06-05

项目资助:国家自然科学基金(41871373)。

第一作者:梅文胜,博士,教授,主要从事精密工程测量与测量自动化教学与研究。wshmei@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:吕世望,硕士。nplxdsy@163.com

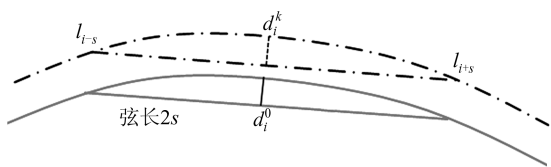


图1 线状结构局部相对变形波动性指标示意图  
Fig.1 Schematic of Linear Structure Partial Relative Deformation Fluctuation Index

定义线状结构局部相对变形波动值为:

$$\delta_i = d_i^k - d_i^0 \quad (1)$$

式中,  $d_i^0$  为首次测量成果中里程  $i$  测点到里程  $i-s$  与里程  $i+s$  测点连线的垂直距离;  $d_i^k$  为第  $k$  次测量的相应距离;  $\delta_i$  表示首期与第  $k$  期之间的相对变形波动值。首期与第  $k$  期之间的垂直距离作差表示累积变形, 相邻两期之间作差表示本期变形。

线状结构局部相对变形波动值的实质为两期检测弦长中点偏距之差, 形式上近似于两期中点弦偏距变化值对里程的导数, 与两期中点弦偏距变化曲线的导数密切相关。

## 2 相对变形波动提取与定位

### 2.1 小波变换与小波分解

小波变换利用系数和规范小波基的积作为基础进行信号分析, 从而可以在时、频两域表征信号的局部特性<sup>[8-9]</sup>。将满足容许条件<sup>[10]</sup>的基本小波函数  $\psi(t)$  进行伸缩和平移得到连续小波函数族  $\{\psi_{a,b}(t)\}$ <sup>[11]</sup>。将连续小波与信号  $f(t)$  进行内积, 得到信号的连续小波变换:

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-a}{b} \right) dt \quad (2)$$

式中,  $\psi^*$  表示  $\psi$  的共轭函数;  $W_f(a, b)$  为小波系数<sup>[10]</sup>, 其中,  $a$  是信号频率相关的伸缩(尺度)因子,  $b$  是与信号时间相关的平移因子。

用 Mallet 算法<sup>[9]</sup>将原始信号  $f(t)$  分解为小波系数低频部分  $A_1$  和小波系数高频部分  $D_1$ , 再对  $A_1$  进行分解得到  $A_2$  和  $D_2$ , 逐层分解最终得到  $A_n$  和  $D_n$ 。对  $A_i$  和  $D_i$  进行重构, 从而得到原始信号在第  $i$  层的近似信号  $a_i$  和细节信号  $d_i$ <sup>[12]</sup>。

### 2.2 维格纳-威尔分布

信号  $f(t)$  的能量在时域和小波域是相同的<sup>[13]</sup>,  $|W_f(a, b)|^2$  可以看作关于尺度  $a$  和平移  $b$  的二元能量分布。维格纳-威尔分布 (Wigner-Ville distribution, WVD) 用于描述信号能量在时频两域的分布, 并且具有平移不变性、不损失信号幅值

和相位信息等优点<sup>[14]</sup>, 比  $|W_f(a, b)|^2$  更适合能量型时-频联合小波分析。对信号  $f(t)$  的瞬时自相关函数进行傅里叶变换, 得到了 WVD 的一般表达式为:

$$D_f(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f \left( t + \frac{\tau}{2} \right) f^* \left( t - \frac{\tau}{2} \right) e^{-i2\pi\tau\omega} d\tau \quad (3)$$

式中,  $f^*$  表示  $f$  的共轭函数;  $t$  表示时间;  $\omega$  表示频率;  $\tau$  表示时间延迟。本文计算方法采用加窗后的平滑伪维格纳-威尔分布 (smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)。

### 2.3 相对变形波形提取

如果原始信号中存在异常相对变形波形, 在该波形的特征频率下, 位于异常波形处的小波能量将产生突变。由于轨道不平顺幅值沿里程基本满足正态分布<sup>[14]</sup>, 根据拉依达准则 ( $3\sigma$  准则) 设定能量阈值用于确定相对变形波形发生的位置。具体提取算法分为确定变形波长和确定变形位置两大步骤。

#### 2.3.1 确定相对变形波长

使用小波分解对原始变形波动值进行处理, 采用的小波基函数由原始数据的特性决定, 由数据量和小波基函数共同确定分解的层数。(1) 对原始信号进行小波分解, 得到不同层数下的近似信号  $a_i$  和细节信号  $d_i$ ; (2) 对所有  $a_i$  和  $d_i$  进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 分析后确定特征波长。在  $a$  中确定特征波长后, 选择对该波长分辨率最大的  $d$  作为下一步分析的原始数据。

#### 2.3.2 确定相对变形位置

和原始信号相比, 经过小波分解再重构后的近似信号和细节信号成分更加单一, 能量分布更为集中, 可以更好地在 SPWVD 中提取相对变形波形的的位置。提取步骤为: (1) 对确定的细节信号  $d$  进行 SPWVD 计算, 得到频率-里程-能量三维分布图; (2) 在频率轴中找到特征波长所对应的频率, 提取出该频率下不同里程处的 SPWVD 能量值  $P(i)$ , 即特征频率对应的里程-能量分布图; (3) 从里程的第  $L$  米开始, 根据  $3\sigma$  准则设定检测阈值  $U(i)$ ,  $U(i)$  是由从  $P(0)$  到  $P(i-1)$  的均值  $E_{P(0,i-1)}$  与标准差  $\sigma_{P(0,i-1)}$  决定的, 计算公式为:

$$U(i) = E_{P(0,i-1)} + 3\sigma_{P(0,i-1)} \quad (4)$$

将检测阈值  $U(i)$  和 SPWVD 能量值  $P(i)$  绘制到同一张图中, 能量值满足  $P(i) > U(i)$  的波形最高点对应的里程数即为相对变形波形的近似位置。

### 3 算法验证与实例分析

#### 3.1 模拟数据计算与分析

模拟高程值与计算相对变形波动值沿里程的分布图如图2所示,其中, $h_1$ 、 $h_2$ 为模拟的两期轨道中心点高程值。高程值采样间隔为0.5 m,中点弦的弦长设为10 m,分别加入了中误差为0.33 mm、幅值为1 mm的正态随机噪声。两期模拟高程值并不重合,在最高点处相差5 cm,但相对关系保持相近。在 $h_2$ 中加入3个沉降幅值为1 mm、波长为10 m的标准下凹全波余弦型沉降曲线模型,沉降最大处的位置分别为140 m、205 m和340 m。

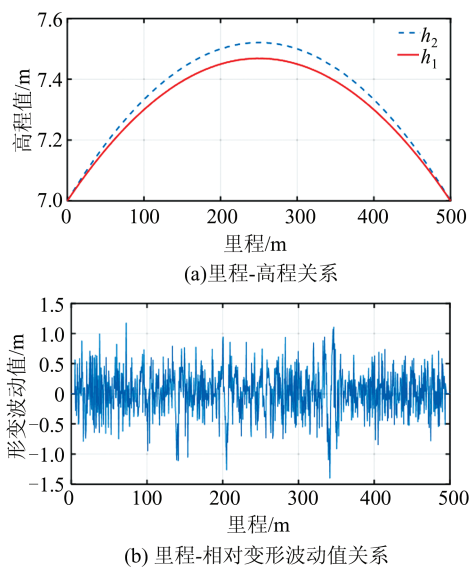


图2 模拟高程值与计算相对变形波动值

Fig.2 Simulation Elevation Data and Calculated Deformation Fluctuations

采用db6(Daubechies6)作为小波基函数,对原始变形波动值进行小波分解。经过查阅文献和实际试验,分解的层数定为6层。各层近似信号的波长-FFT频谱图如图3所示,细节信号频谱图如图4所示,标出每张图幅值最大点的横坐标,即特征波长,由于 $a_5$ 与 $a_6$ 幅值最大点对应的特征频率为0,波长为无穷大,所以不标出峰值。

分析FFT频谱图可得:(1)特征波长10.427 m在近似信号 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 中都有最大幅值,并且与中点弦的弦长接近,因此,将其定为待提取相对变形波形的特征波长;(2)特征波长10.427 m在各层细节信号 $d$ 中都有对应的波峰, $d_4$ 中最为显著,可知 $d_4$ 对于待提取特征波长10.427 m,具有最大的时空分辨率,换算成特征频率为0.096 /m,将 $d_4$ 定为下一步进行波形位置确定的数据。

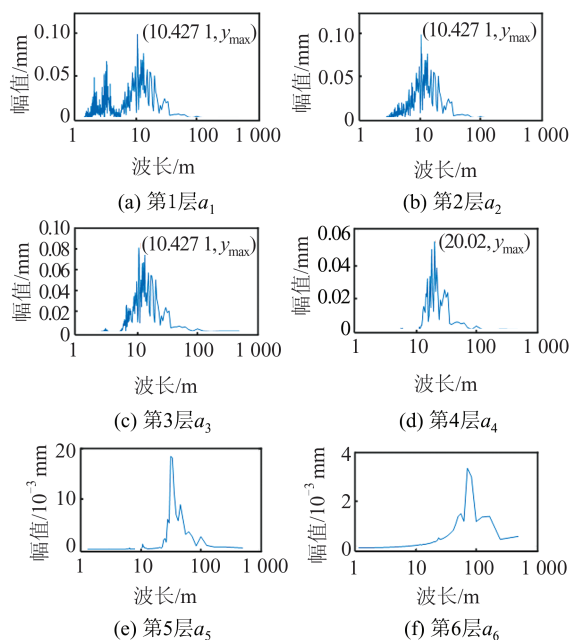


图3 近似信号 $a$ 的FFT频谱

Fig.3 Amplitude Spectrum of Approximate Signal  $a$

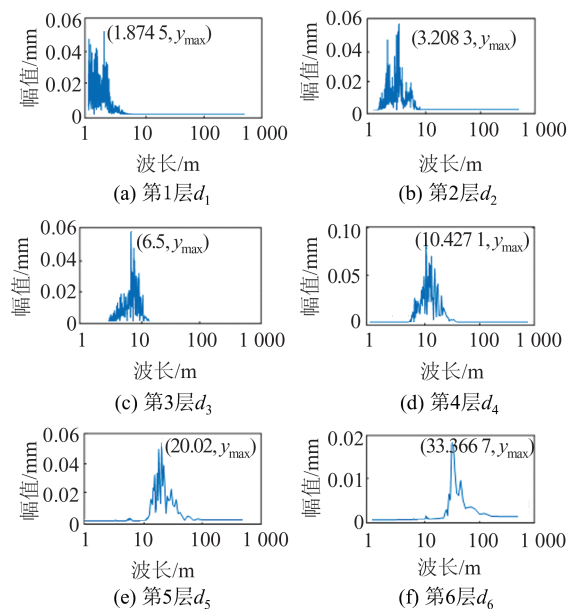


图4 细节信号 $d$ 的FFT频谱

Fig.4 Amplitude Spectrum of Detail Signal  $d$

计算 $d_4$ 的SPWVD得到能量三维分布图见图5,反映了能量在里程和频率两域的分布。

提取出特征波长10.427 m对应的不同里程处的SPWVD能量值 $P(i)$ ,如图6中实线所示。 $L$ 取50 m,设定检测阈值 $U(i)$ ,将 $U(i)$ 和 $P(i)$ 绘制到图6中,满足 $P(i) > U(i)$ 的波形最高点对应的里程数即为相对变形波形的近似位置,可知存在3处波形,位置分别位于里程136.25 m、200.25 m、336.75 m处附近。

从原始变形波动值中的相应位置提取出的波形形状非常不规则,这是由于原始变形波动值

含有许多高频噪声,不利于幅值的确定。多层近似信号可以看作是原始数据逐步去噪、简化后得到的信号,在近似信号中,提取相对变形波形可以得到更好的结果。

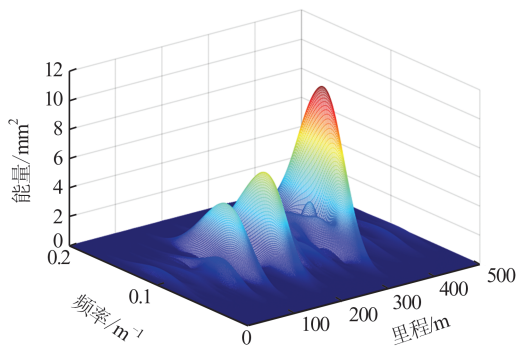


图5 细节信号 $d_4$ 的SPWVD能量分布

Fig.5 SPWVD Energy Distribution of the Reconstructed Detail Signal  $d_4$

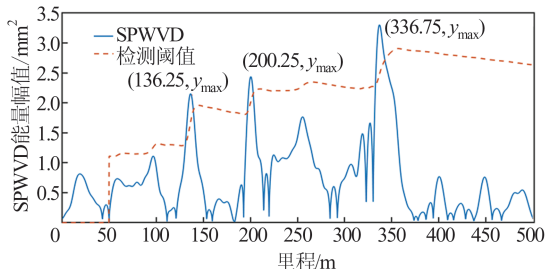


图6 特征波长对应的里程-SPWVD分布曲线

Fig.6 Mileage-SPWVD Energy Distribution of Characteristic Wavelengths

图7是从第2层近似信号 $a_2$ 的相应位置提取出的局部相对变形波形,标注出沉降最大处的里程和幅值。这些波形和标准沉降曲线波形相似,幅值分别为0.91 mm、0.94 mm、0.98 mm,与预设值1 mm相近。由图7可知,提取的相对变形波形的里程范围为136.25~146.68 m、200.25~210.43 m、336.75~347.18 m,与预设相对变形波形位置接近。将提取局部相对变形波形信息与预设值汇总到表1中,可以发现,通过本文算法检测得到的结果与预设值接近。

### 3.2 实测数据计算与分析

采用以下两个实测数据进行计算与分析:

- (1)将轨道设计值加上随机误差作为首期观测值,实际扫描的数据作为当前期值;
- (2)同一轨道短时间内扫描两次所得点云。

#### 3.2.1 实测数据1

数据来源于武汉地铁某区间三维激光扫描点云,使用的仪器为徕卡 ScanStation P30,精度指标为测距误差1.2 mm+10 mm/km,角度误差8",每隔0.5 m截取一个断面<sup>[15]</sup>,从断面点云中提取出左右轨面处的点云,取平均值得轨道中心点高

程,截取里程为42 613.656~43 113.156 m,总长为499.5 m。在高程设计值中加入中误差为0.85 mm的随机噪声。对高程的测量值与设计值进行上述相对变形波形提取算法的处理,将中点弦的弦长分别设为5 m、10 m和15 m,分别计算不同中点弦的弦长对应的相对变形波形。

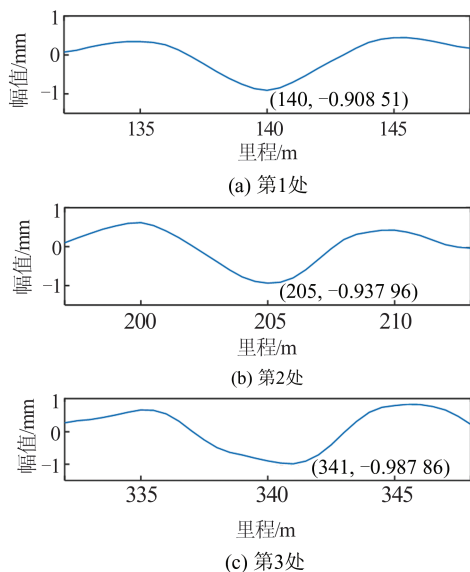


图7 从 $a_2$ 中提取的相对变形波形

Fig.7 Extraction Results from the 2 Reconstructed

Approximate Signal  $a_2$

表1 提取波形与预设波形数据对比

Tab.1 Comparison of Extraction Results and Default Values

数据源	波形数量	波长/m	里程范围/m	幅值/mm
算法提取	3	10.427	136.25 ~ 200.25	0.91
			200.25 ~ 210.43	0.94
预设值	3	10	135 ~ 145	1
			200 ~ 210	1

对10 m弦长变形波动值进行小波分解、重构和FFT分析,近似信号 $a$ 的FFT结果如图8所示,波长9.615 m表现最显著,在 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 中均表现为最大幅值,因此,定特征波长为9.615 m。

特征波长在第4层细节信号 $d_4$ 中幅值最大,具有最高的分辨率,故选择 $d_4$ 计算其SPWVD。提取特征波长9.615 m所对应的里程-能量分布曲线,设置阈值,提取能量分布曲线超过阈值的波峰顶点对应里程,即为相对变形位置,如图9所示。由图9可知,存在4个相对变形波形,位置分别为42 700.656 m、42 940.656 m、43 024.906 m、43 054.906 m。在近似信号 $a_2$ 的相应位置提取4个相对变形波形,将波形的位置、幅值、范围等信息汇总如表2所示。

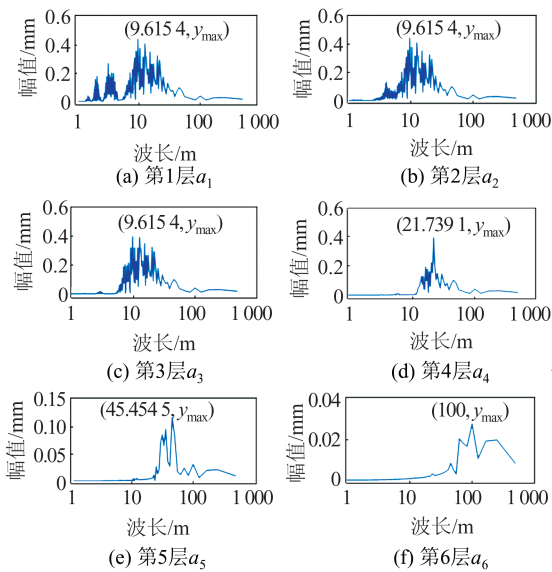


图8 近似信号 $a$ 的FFT频谱

Fig.8 Amplitude Spectrum of Approximate Signal  $a$

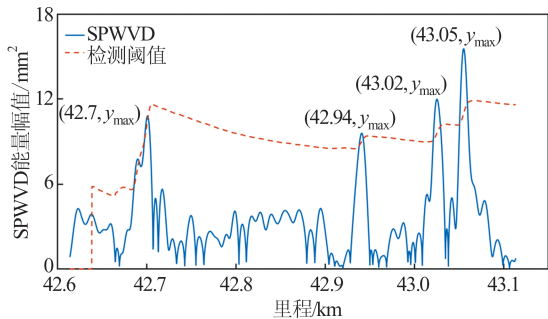


图9 相对变形波形位置的提取

Fig.9 Extraction Locations of Abnormal Deformation

表2 10 m弦长下的相对变形波形

Tab. 2 Information of Abnormal Deformation Waves in 10 m Midpoint Chord

近似位置/m	幅值/mm	里程范围/m	形变最大位置/m
42 700.656	2.99	42 696.156~42 705.156	42 700.156
42 940.656	3.18	42 936.656~42 946.156	42 941.656
43 024.906	2.57	43 024.650~43 034.156	43 030.156
43 054.906	5.55	43 051.656~43 062.156	43 057.156

使用相同方法对弦长为5 m和15 m的情况提取相对变形,结果如表3所示。该算法可以提取出波长与事前给定的中点弦的弦长近似的相对变形波形,不同弦长所提取出的波形互不相同。

表3 5 m和15 m弦长下的相对变形波形

Tab. 3 Information of Abnormal Deformation Waves in 5 m and 15 m Midpoint Chord

弦长/m	近似位置/m	幅值/mm	里程范围/m	形变最大位置/m
5	43 008.656	2.79	43 006.656~43 011.156	43 008.656
5	43 046.906	1.92	43 042.656~43 047.156	43 044.656
15	43 011.406	3.30	42 997.156~43 011.656	43 004.156

### 3.2.2 实测数据2

数据2为武汉地铁某区段同一晚上推行两趟获取的数据,小车上使用的扫描仪为徕卡ScanStation P30,截取里程范围为13 633.36~14 134.36 m,总长为501.00 m。将中点弦的弦长分别设为8 m和20 m,分别提取出变形波形。对于8 m弦长,对变形波动值进行小波分解、重构和FFT分析,结果显示波长8.358 m表现最为显著,将此波长定为特征波长。特征波长在 $d_4$ 中幅值最大,具有最高的分辨率,提取 $d_4$ 的SPWVD中特征波长8.358 m所对应的能量值,组成里程-能量分布曲线,设置阈值,结果如图10所示,由图10可知,原始相对变形波动波形中不存在波长在8 m附近的变形波形。

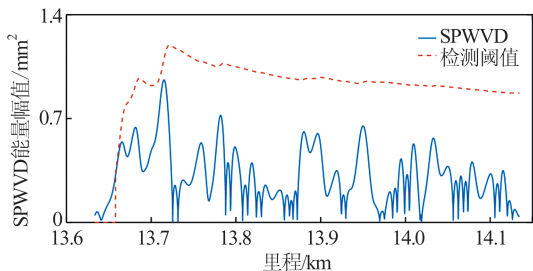


图10 8 m中点弦下的相对变形波形的位置提取

Fig.10 Extraction Locations of Abnormal Deformation Under 8 m Midpoint Chord

图11为中点弦的弦长为20 m(特征波长21.804 m)的SPWVD-阈值图,从图11中不能提取出相应波长的相对变形波动波形。

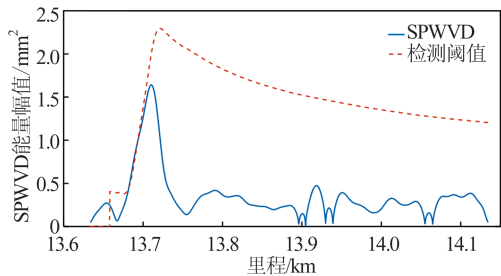


图11 20 m中点弦下的相对变形波形的位置提取

Fig.11 Extraction Locations of Abnormal Deformation Under 20 m Midpoint Chord

## 4 结 语

本文在定义线状结构局部相对变形波动值的基础上,对地铁三维激光扫描点云中提取的轨道数据进行小波分析与SPWVD分析,可以识别相应波长的相对变形波形,并确定其影响范围和最大变形幅值。对原始的变形波动值进行多层小波分解与重构,使信号中的待提取成分表现更

为显著,分辨率更高,从而确定相对变形波形的波长。SPWVD 具有明确的物理意义,可以用于能量检测,从而确定相对变形波形的位置。实例分析的研究结果表明,本文提出的相对变形提取算法具有一定的有效性和准确性,可以提取波长与中点弦的弦长接近的相对变形波形,能够达到较好的相对变形波形信息检测的效果。

后续研究将采用此方法分析地铁隧道结构侧壁的横向水平和顶壁的垂向线状相对变形,期望从多期地铁扫描数据中检测出更多有效变形信息。

### 参 考 文 献

- [1] Liu Yanping, Cheng Xiaojun, Jia Dongfeng. Tunnel Convergence Analysis Based on 3D Laser Scanning [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, 41(3): 74-77 (刘燕萍, 程效军, 贾东峰. 基于三维激光扫描的隧道收敛分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(3): 74-77)
- [2] Liu Shaotang, Pan Jiechen. An Expression Relating the Overall Convergence and Deformation of Tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2013, 50(5): 34-37 (刘绍堂, 潘洁晨. 一种隧道整体收敛变形的表达方法[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 34-37)
- [3] Chen Yong. Track Detection and Adjustment Algorithm of Curve Based on Laser Scanning Technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016 (陈勇. 基于激光扫描技术的轨道检测与曲线整正算法设计[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016)
- [4] Xu Lei, Wang Changjin. Research on the Automated Extraction of Tunnel Cross Section [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(8): 94-99 (许磊, 王长进. 隧道断面自动提取方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(8): 94-99)
- [5] Wang Lingwen, Cheng Xiaojun, Wan Chenghui. Study on the 3D Laser Scanning Technology for Tunnel Inspection [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, 41(7): 53-57 (王令文, 程效军, 万程辉. 基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(7): 53-57)
- [6] Liu Shaotang, Liu Wenkai, Zhou Yueyin. A Tunnel Overall Deformation Monitoring Method and Its Application [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 981-986 (刘绍堂, 刘文楷, 周跃寅. 一种隧道整体变形监测方法及其应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 981-986)
- [7] Chen Haijun. Study on the New Calculation Method for Medium and Long-Wave Track Irregularity of High-Speed Railway [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(5): 227-230 (陈海军. 高铁轨道中长波不平顺值计算新方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(5): 227-230)
- [8] Xu Lei, Chen Xianmai, Xu Weichang, et al. Explored of Track Irregularity's Characteristic Identification Based on Wavelet Method and Wigner-Ville Distribution [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3344-3350 (徐磊, 陈宪麦, 徐伟昌, 等. 基于小波和 Wigner-Ville 分布的轨道不平顺特征识别[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3344-3350)
- [9] Xu Lei, Chen Xianmai. Analysis on Track Characteristic Irregularity Based on Wavelet and Wigner-Hough Transform [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(5): 88-95 (徐磊, 陈宪麦. 基于小波和 Wigner-Hough 变换的轨道特征不平顺联合分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 88-95)
- [10] Xu Lei, Chen Xianmai, Xu Weichang, et al. Application of Wavelet Energy Spectrum in Railway Track Detection [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(4): 605-612 (徐磊, 陈宪麦, 徐伟昌, 等. 小波能量谱在铁路轨道检测中的应用[J]. 振动工程学报, 2014, 27(4): 605-612)
- [11] Daud W M B W, Sudirman R. Time Frequency Analysis of Electrooculograph (EOG) Signal of Eye Movement Potentials Based on Wavelet Energy Distribution [C]// The Fifth Asia Modelling Symposium, Manila, Philippines, 2011
- [12] Praveena M S, Vennila I. Fusion of Image Scheme Based on Mallet Algorithm and Curvelet Transform [C]// Recent Trends in Information Technology, Chennai, India, 2011
- [13] Cheng Baojia, Li Li, Zhang Yuan. Application of Scale-Wave Power Spectrum to Fault Diagnosis of Internal Combustion Engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2006, 24(3): 284-287 (陈保家, 李力, 张园. 尺度-小波能量谱在内燃机故障诊断中的应用[J]. 内燃机学报, 2006, 24(3): 284-287)
- [14] Xu Lei, Gao Jianmin, Zhai Wanming, et al. Localization Methods for Track Irregularity Wavelengths and Track Diseases [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(11): 3060-3068 (徐磊, 高建敏, 翟婉明, 等. 铁路轨道不平顺波长及病害波形的定位方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 3060-3068)
- [15] Tuo Lei, Kang Zhizhong, Xie Yuancheng, et al. Continuously Vertical Section Abstraction for Deformation Monitoring of Subway Tunnel Based on Terrestrial Point Clouds [J]. *Geomatics and Information*

*Science of Wuhan University*, 2013, 38(2): 171-175  
(托雷, 康志忠, 谢远成, 等. 利用三维点云数据的

地铁隧道断面连续截取方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(2): 171-175)

## Detecting and Locating Method for Subway Track Relative Deformation

MEI Wensheng<sup>1</sup> LÜ Shiwang<sup>1</sup> YU Anbin<sup>1</sup> ZHANG Peng<sup>1</sup> WANG Tao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** **Objectives:** Nowadays, most 3D laser scanning in subway tracks is used to survey the tracks' diameter convergence so as to determine whether section deformation takes place between different periods. However, no measurement has been conducted on the subway track deformation with this method. **Methods:** Therefore, using wavelet analysis and Wigner-Ville distribution, this paper carries out the locating research on subway track relative deformation based on point cloud data. The first step is data preprocessing. On the basis of the subway point cloud data acquired by 3D laser scanners, sections are intercepted continuously in equal intervals, and track traits are recognized in section point cloud for track elevation extraction. Then, we define the partial relative deformation fluctuation indexes of the linear structure to describe the relative spatial relationships of partial tracks between different stages. Last but not least, this paper presents an extraction method for abnormal partial relative deformation based on wavelet analysis and smoothed pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD). First, we need to choose a suitable basic function and decomposition level, decompose relative deformation fluctuation by the wavelet method, and calculate the characteristic wavelength based on the fast Fourier transform of signals in different levels. Second, the SPWVD value of decomposed-then-reconstructed signals and the energy corresponding to different mileages in the characteristic wavelength should be determined, and the energy threshold should be set based on the  $3\sigma$  criterion to locate the relative deformation wave. Third, the range of relative deformations should be settled in relative deformation fluctuations. **Results:** This paper verifies the feasibility of this algorithm using simulated data and concrete example analysis. Through the calculation of simulated data, the waveform detected by this method has an approximate location and range with the preset value. By the concrete example analysis, two results are obtained. After the comparison of the design value with the concrete scanning value of the same track, relevant information of relative deformation in characteristic wavelengths is successfully detected. With the scanning point cloud data in two periods that have short time intervals, relative deformation in any characteristic wavelength can hardly be detected. **Conclusions:** The calculation results prove the feasibility of this algorithm, show the energy distribution of track relative deformation in both time and frequency domains, and effectively extract the relevant information of track relative deformations, providing a new method to monitor the track relative deformation.

**Key words:** 3D laser scanning; track relative deformation; wavelet transformation; Wigner-Ville distribution

**First author:** MEI Wensheng, PhD, professor, specializes in teaching and research in precise engineering survey and automatization of measurement. E-mail: wshmei@sgg.whu.edu.cn

**Corresponding author:** LÜ Shiwang, master. E-mail: nplxdy@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41871373).

**引文格式:** MEI Wensheng, LÜ Shiwang, YU Anbin, et al. Detecting and Locating Method for Subway Track Relative Deformation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 104-110. DOI:10.13203/j.whugis20190445 (梅文胜, 吕世望, 于安斌, 等. 一种地铁轨道相对变形检测与定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(1): 104-110. DOI:10.13203/j.whugis20190445)