

基于经验模态分解法的下穿铁路工程 对既有轨道变形监测数据降噪方法

潘兴良¹ 刘建国^{2,3}

(1. 中铁七局集团有限公司, 450016, 郑州; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;
3. 上海轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 针对下穿铁路工程中既有轨道变形的现场监测数据存在多种因素干扰,难以真实反映下穿铁路工程对既有轨道结构实际影响的问题,将现场监测数据的干扰因素分为测量仪器误差,以及造成既有轨道结构变形的环境温度。根据测量误差、造成既有轨道结构变形的温度,以及下穿铁路工程引起的既有轨道结构附加变形等 3 类数据组成成分在频域分布集中区域不同的特点,利用 EMD(经验模态分解)法分离上述 3 类既有轨道结构变形监测数据组成成分,剔除既有轨道结构变形监测数据中的干扰因素信号,实现下穿铁路工程中既有轨道变形监测数据的降噪。以某地铁盾构隧道下穿铁路工程现场实测数据为例进行信号分类分析。结果表明,该方法可有效剔除现场变形监测数据中存在的干扰因素成分,从而获得由下穿铁路工程引起的既有轨道结构真实变形。

关键词 下穿铁路工程; 轨道变形; 监测数据降噪方法; 经验模态分解法

中图分类号 U213.2⁺13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.019

Noise Reduction Method of Track Deformation Monitoring Data of Under-crossing Railway Engineering Project Based on EMD

PAN Xingliang, LIU Jianguo

Abstract In view of the fact that there are many interference factors in the actual monitoring data of track deformation of under-crossing railway engineering, it is difficult to reflect the actual influence of under-crossing railway engineering on track structure. The interference factors of actual monitoring data are divided into measurement instrument error and track structure deformation caused by environmental temperature. According to the different characteristics of three types of monitoring data components such as measurement error, temperature of track structure deformation and additional deformation of track structure caused by under-crossing railway engineering in frequency domain, EMD (empirical mode decomposition) is used to se-

parate the components of the above three, to eliminate the interference factor signals in track structure deformation monitoring data, and to realize noise reduction of track deformation monitoring data of under-crossing railway engineering. Taking the actual monitoring data of certain metro shield tunnel under-crossing existing railway engineering project as an example, the signal separation results show that this method can effectively eliminate the interference factors in the site monitoring data signal, so that the real deformation of the track structure caused by under-crossing railway project is obtained.

Key words under-crossing railway engineering; track deformation; noise reduction method of monitoring data; EMD (empirical mode decomposition)

First-author's address China Railway Seventh Bureau Group Co., Ltd., 450016, Zhengzhou, China

1 经验模态分解法概述

近年来,随着我国铁路交通网的迅速发展,城市轨道交通下穿铁路工程施工愈加频繁,不限速、长距离、大跨度地安全下穿铁路是未来施工的发展方向。这需要下穿铁路工程在进行合理设计与施工的同时,加强对既有铁路轨道结构变形的实时、高精度监测,及时反映施工情况,达到信息化施工的目的,从而最大程度地控制下穿铁路工程中既有轨道的变形^[1]。然而,在对下穿铁路工程中的既有轨道结构进行变形监测时,除了由监测设备本身以及各类环境因素影响而产生测量误差外,其监测对象如既有轨道结构自身还会因环境温度变化而发生变形^[2],这些因素会掩盖由下穿铁路工程施工所引起的既有轨道结构的真实附加变形,影响对现场施工实际情况的判别。因此,根据各类影响因素引起的既有轨道结构监测数据的变化特征,有针对性地监测数据进行降噪,尽可能地还原下穿铁路工

程施工引起的既有轨道结构附加变形,有待作进一步的深入研究。

将既有铁路轨道结构测点的变形监测数据视为1组时间序列,其主要由测量误差成分、温度变形成分和下穿施工引起的附加变形成分构成,且具有非平稳性、非线性的变化特征。对于时间序列中的信号成分提取问题,常用的方法主要有低通滤波法^[3]、小波分析法^[4]和 EMD(经验模态分解)法^[5]等。

在采用低通滤波法时,首先需要通过傅里叶变换将时间序列转换至频域上进行分析;然后利用下穿铁路工程施工引起的附加变形成分相较于测量误差成分及温度变形成分具有的变化周期最长的特点,运用低通滤波法提取附加变形成分,但运用时必须选择合适的滤波器参数和截止频率,否则会因参数选择不合理导致附加变形成分过少被提取或提取的附加变形成分掺杂过多的干扰信息。此外,虽傅里叶变换能够完成信号的时、频域转换,但不能同时具有二者信息。因此,该方法仅适用于平稳信号的处理,并不太适用于处理非平稳信号。

小波分析法通过傅里叶变换,将时域上无限长的正弦波函数转换成能量在时域上十分集中的小波方式,解决了傅里叶变换不能同时反映时频信息的问题。但运用小波分析法处理具体信号时,同样需要对小波基、分解层数和去噪方式等进行选择,不合理的参数选择会影响信号的降噪效果。文献[6-7]于1998年提出了希尔伯特-黄变换(以下简为“Hilbert变换”)方法。该方法由 EMD 法及对应的 Hilbert 变换构成:首先,通过 EMD 法,根据信号自身的时间尺度特征将原始信号自适应地分解得到数个 IMF(内蕴模态函数),并通过对每个 IMF 作相应的 Hilbert 变换,从而获得其随时间变化的瞬时频率与瞬时幅值,即 Hilbert 时频谱;然后,将 Hilbert 时频谱在时间上进行积分,可求得 Hilbert 边际谱,而 Hilbert 边际谱能够反映对应的 IMF 的各个瞬时频率的总幅值大小,这是 IMF 的重要表征函数;最后,利用各阶 IMF 的 Hilbert 边际谱特征,将周期变化趋势相近的若干阶 IMF 叠加,重构周期趋势成分,实现对原始信号中各成分的提取。EMD 法从信号的瞬时频率出发,是局部的、自适应的信号成分分离方法,同时适合处理非平稳、非线性的信号。

本文利用 EMD 法分离下穿铁路工程中既有铁路轨道结构变形监测数据的组成成分,剔除轨道结

构变形监测数据中的干扰因素信号,实现该工程中对既有铁路轨道结构变形监测数据的降噪与分析。

2 EMD 法的计算原理

任何非平稳、非线性的复杂信号都是由一些不同的 IMF 构成,且任意两阶的 IMF 相互独立。

其中,IMF 是单分量信号,这就需要其满足下列条件:①对于整个数据集,IMF 上的极值点及过零点的数目必须相等或最多相差1个;②在任意时刻,由局部极大值点所构成的上包络线和局部极小值点所构成的下包络线的平均值为零,即上包络线和下包络线相对于时间轴而言是局部对称的。

基于上述假设,可以在无需先验证基函数的情况下,根据信号自身时间尺度特征,自适应地将多分量复杂信号分解成多阶内蕴模态函数及余项之和。

$$x(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r_m(t) \quad (1)$$

式中:

t ——信号采集对应的时间;

$c_i(t)$ ——IMF 分量;

$r_m(t)$ ——余量;

$x(t)$ ——信号幅值。

这种筛分过程能够根据原始信号自身特征,将信号中不同的频率成分按照高频至低频的顺序,分解成符合单变量信号特征的各阶 IMF,余项则是原始信号中的趋势项。

利用 EMD 法从原始信号中分解出的各阶 IMF 及趋势项不一定具有明确的物理含义。但根据各阶 IMF 时间尺度上的变化特征,将周期趋势相近的 IMF 进行叠加,可重构出具有明确物理含义的各周期趋势成分。

由式(2)一式(7)可计算得到各阶 IMF 的 Hilbert 幅值谱及边际谱。确定其在频域上的频率分布特征,便于实现对各阶 IMF 进行分类与组合。

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \frac{1}{\pi t} \quad (2)$$

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (4)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

$$H(t, \omega) = \operatorname{Re}(a(t) e^{j\int \omega(t) dt}) \quad (6)$$

$$h(\omega) = \int_0^T H(t, \omega) dt \quad (7)$$

式中:

- τ ——积分变量;
- T ——自然数序列;
- j ——虚数;
- $\hat{x}(t)$ ——初始信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换;
- $a(t)$ ——瞬时幅值;
- $\theta(t)$ ——相位函数;
- $\omega(t)$ ——瞬时频率;
- $H(t, \omega)$ ——Hilbert 幅值谱;
- $h(\omega)$ ——Hilbert 边际谱。

此外,对于离散的数字信号而言,Hilbert 边际谱可由式(8)一式(9)求得:

$$h(n\Delta\omega) = \sum_k H(t_k, n\Delta\omega) \quad (8)$$

$$t_k = k\Delta t \quad (9)$$

式中:

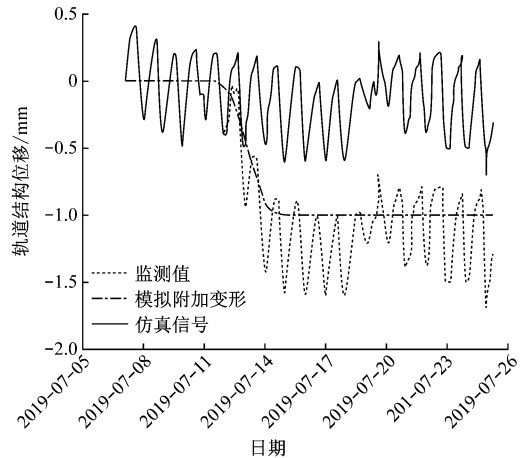
- n ——离散的频率间隔, $k, n \in \mathbb{Z}$;
- k ——离散的时间间隔, $k, n \in \mathbb{Z}$;
- $h(n\Delta\omega)$ ——离散数字信号 Hilbert 边际谱;
- t_k ——离散时刻;
- $H(t_k, n\Delta\omega)$ ——对应于 t_k 的 Hilbert 幅值谱;
- $\Delta\omega$ ——频率分辨率;
- Δt ——采样时间间隔。

3 某地铁盾构隧道下穿铁路工程仿真算例

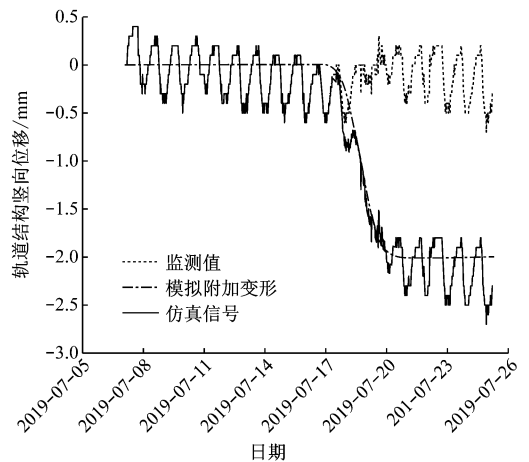
本文采用在某地铁盾构隧道下穿既有铁路工程中,盾构推进至既有铁路影响范围之前的监测数据中添加附加变形模拟数据的方式,构建仿真信号。为贴近工程实际,附加变形模拟数据考虑了既有铁路轨道结构变形控制较为理想(第1类)、不够理想(第2类),以及在发生较大附加变形后采取适当措施使其部分恢复(第3类)的3类典型工况。3类仿真信号如图1所示。

以第1类仿真信号为例,经 EMD 法分解得到的各阶 IMF 如图2所示。

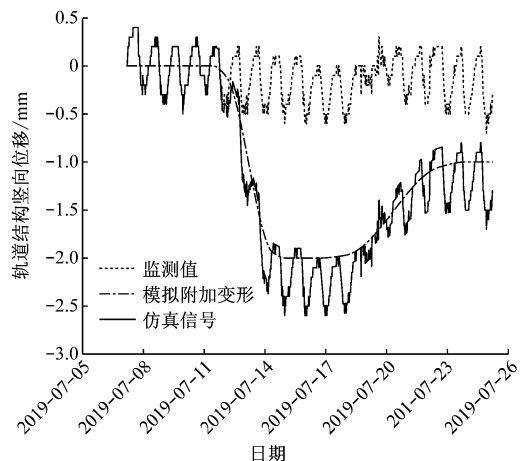
由图2可看到,各阶 IMF 的周期趋势特征大体上以日周期变化为界,分为3类;而各类 IMF 的叠加分别对应测量误差成分、温度变形成分和附加变形成分。为了进一步明确3类成分所含有的 IMF,计算各阶 IMF 的 Hilbert 边际谱。为了避免边际谱幅值的影响,将上述边际谱量纲一化,如图3所示。



a) 第1类仿真信号



b) 第2类仿真信号



c) 第3类仿真信号

图1 3类仿真信号

Fig. 1 Three types of simulation signals

由图3可看到,随着 IMF 的阶数升高,各阶 IMF 的 Hilbert 边际谱频率峰值逐渐变小。仿真信号中高频部分主要集中在第1阶 IMF,反映了测量

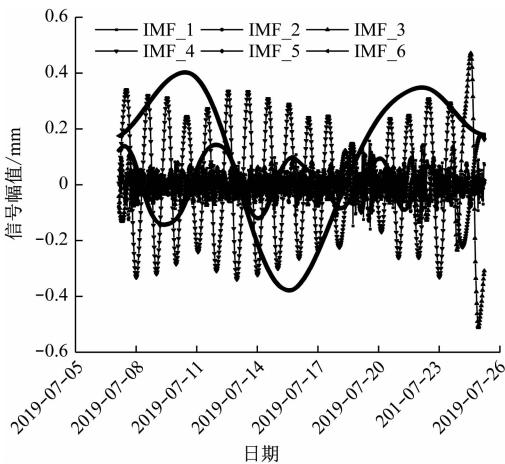


图2 第1类仿真信号经 EMD 法分离得到的各阶 IMF
Fig. 2 IMF of the first type of simulated signals obtained by EMD separation

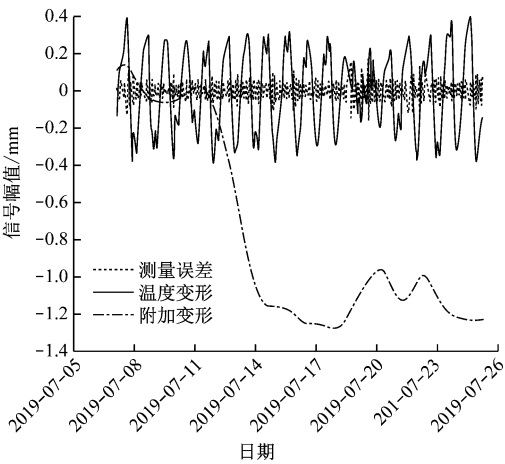


图4 第1类仿真信号中3类信号成分提取结果
Fig. 4 Extraction result of three types of signal components in the first type of simulation signal

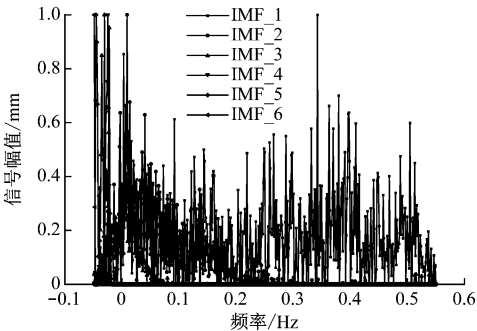


图3 仿真信号各阶 IMF 量纲一化后的 Hilbert 边际谱
Fig. 3 Hilbert marginal spectrum of normalized IMF of simulated signals

误差成分;中频部分主要集中在第2~4阶IMF,反映了温度变形成分;低频部分主要集中在第5~6阶IMF及余项,反映了附加变形成分。

对各阶IMF归类叠加之后,分离出的3类信号成分如图4所示。

从3类信号成分提取结果中可看到,3类信号成分得到了有效分离。其中,测量误差成分集中在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 左右;温度变形成分有明显的周期变化趋势,其变化幅值约为 $\pm 0.3\text{ mm/d}$,附加变形成分变化趋势与事先添加的附加变形模拟数据基本一致。3类仿真信号附加变形成份提取结果评价见表1。

4 某地铁盾构隧道下穿铁路工程实测数据分析

为验证降噪效果,选取某地铁盾构工程下穿既有铁路车站工程的轨道结构变形监测数据进行分

表1 3类仿真信号附加变形成份提取结果评价

Tab. 1 Extraction evaluation results of additional deformation components of three types of simulation signals

名称	平均绝对误差/mm	均方根误差/mm	相关系数
第1类仿真信号	0.123	0.148	0.986
第2类仿真信号	0.117	0.147	0.993
第3类仿真信号	0.126	0.154	0.994

析。该地铁盾构工程下穿了客货共线铁路、快速铁路及高速铁路。其中,客货共线铁路为非电气化铁路,采用有砟道床、混凝土轨枕,设计速度为120 km/h;快速铁路为I级双线,采用有砟道床、混凝土轨枕,设计速度为200 km/h;高速铁路采用有砟道床、混凝土轨枕,设计速度为250 km/h,线下预留350 km/h的提速条件。监测仪器采用徕卡TM30型全站仪,该型仪器角度的监测精度为 $0.5''$,距离的监测精度为 $0.2\text{ mm}+0.4\times 10^{-6}L$ (L 为距离)。

高速铁路轨道结构某测点沉降监测数据,如图5所示。

由图5可看到,高速铁路轨道结构变形监测数据中除了由盾构下穿引起的线路沉降以外,还明显包含呈周期变化趋势的轨道结构温度变形成分及测量误差成分。通过EMD法分解上述实测数据得到各阶IMF,以及对应的量纲一化后Hilbert边际谱,如图6~7所示。

同样地,将各阶IMF的Hilbert边际谱按照频率的集中范围分成高频、中频、低频3组,分别对应3类信号成分。具体地,第1阶IMF对应测量误差成

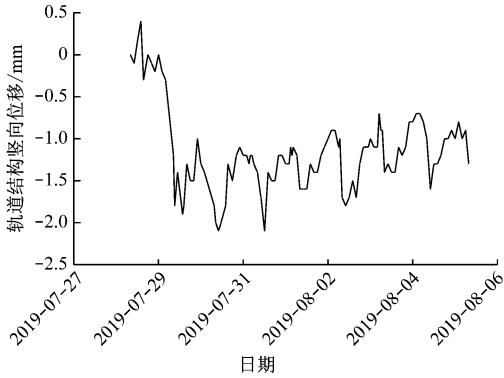


图5 高速铁路轨道结构变形实测数据
Fig. 5 Measured data of track structure deformation of high-speed railway

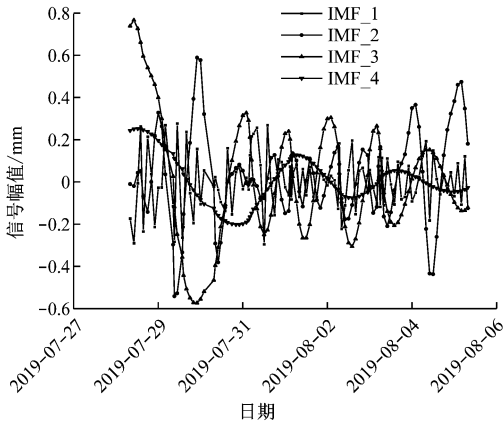


图6 高速铁路轨道结构实测数据分解出的各阶 IMF
Fig. 6 Decomposition of IMF from measured data of high-speed railway track structure

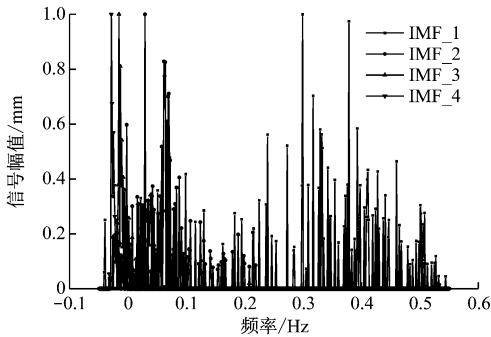


图7 实测数据的各阶 IMF 量纲一化后的 Hilbert 边际谱
Fig. 7 Hilbert marginal spectrum of normalized IMF of measured data

分;第2、3阶 IMF 对应温度变形成分;第4阶 IMF 及其余项对应附加变形成分。实测数据的3类信号成分提取结果如图8所示。

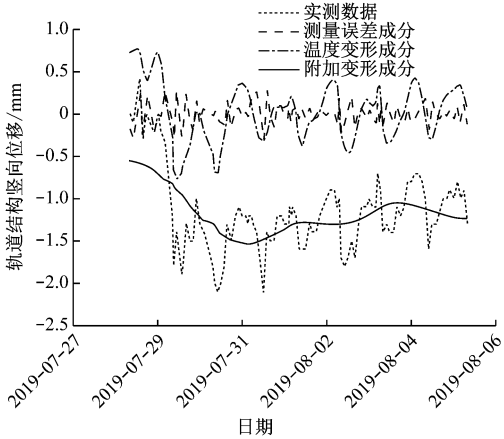


图8 高速铁路轨道结构实测数据中各信号成分提取结果
Fig. 8 Extraction results of signal components from measured data of high-speed railway track structure

从实测数据中3类信号成分提取结果可看到,3类信号在时间序列端点处的数值存在明显的失真现象。例如,温度变形成分周期性变化幅值达到了近1.5 mm,同时附加变形成分在下穿盾构还未对线路产生影响时,轨道结构就已产生了0.5 mm左右的沉降,这显然都不符合实际情况。产生此类情况的主要原因在于 EMD 法中常见的“端点效应”。

由于基于 EMD 法构建的信号上、下包络线是通过局部极值点得到的,这就导致除非待处理的信号端点正好为局部极值点,否则获得的信号上、下包络线在端点处无法取得精确值而产生拟合误差;且随着迭代过程的进行,该误差始终存在,其影响区域还会从端点处向信号内部扩散,最终“污染”整条信号,这就是所谓的端点效应。

为了克服端点效应,文献[7]提出了特征波延拓法,但并未给出具体解释。在后续针对 EMD 法的研究中,国内外众多学者都提出了很多延拓方法,大致研究方向主要集中在神经网络延拓^[8]、镜像延拓^[9-10]和自回归模型延拓^[11-12]等。

本文从实测数据变化特点及快速有效的角度出发,选取了镜像闭合延拓的方法。根据信号端点的分布特性,选择适合的对称位置对实测数据信号两端进行延拓,使得实际的端点数据不在待处理信号的端点上,避免产生端点效应。

经过镜像闭合延拓处理之后的实际监测数据分解出的3类信号如图9所示。由图9可看到,在端点处3类信号都得到了有效收敛,抑制了端点效应,提高了 EMD 法的分解精度。

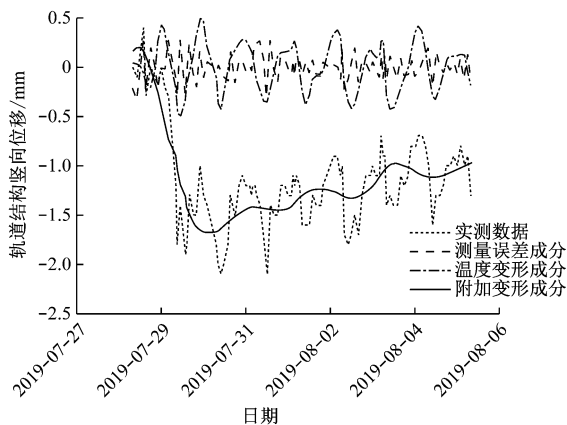


图9 镜像闭合延拓后实测数据各信号成分提取结果

Fig. 9 Extraction results of signal components from measured data after mirror image continuation

5 结论

1) EMD 法能够实现对测量误差、环境温度引起的轨道结构竖向变形,以及邻近铁路工程施工引起的轨道结构附加变形等3类信号成分的有效分离。在3类典型工况下,运用该方法所提取的轨道结构附加变形成分与附加变形模拟信号之间的平均绝对误差在0.1 mm左右。

2) 利用 EMD 法提取的附加变形成分存在“端点效应”,即在端点处存在数据发散的失真现象,难以真实反映工程实际情况。利用镜像闭合延拓方法可以有效消除端点效应,实现了对下穿铁路工程轨道变形监测数据的有效降噪。

参考文献

- [1] 金海元. 输水管道群下穿既有铁路软土地基变形控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(11):111.
JIN Haiyuan. Research on deformation control technologies of water pipe cluster jacking through soft soil foundation of the existing railway[J]. Railway Construction Technology, 2018(11):111.
- [2] 杨冠岭. 高墩大跨桥上有砟轨道无缝线路稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
YANG Guanling. Research on stability of high-pier and large-span bridge ballasted jointless track[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [3] 张杨洋. 滤波算法在数字图像降噪中的应用[J]. 自动化应

用, 2020(12):49.

ZHANG Yangyang. Application of filtering algorithm in digital image denoising[J]. Automation Application, 2020(12):49.

- [4] 辛元明, 谭峰, 田芳明. 基于小波变换的植物电信号降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019(12):190.
XIN Yuanming, TAN Feng, TIAN Fangming. Research on denoising method of plant electrical signal based on wavelet transform[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019(12):190.
- [5] 司友强, 吕润华, 李梦茹. 基于 EMD 与 EEMD 的最优降噪光滑模型在地震波中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2020(1):11.
SI Youqiang, GUO Runhua, LI Mengru. Application of optimal noise reduction smooth model based on EMD and EEMD in seismic waves[J]. CT Theory and Applications, 2020(1):11.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society. A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903.
- [7] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999(31):417.
- [8] 邓拥军, 王伟, 钱成春, 等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的研究[J]. 科学通报, 2001(3):257.
DENG Yongjun, WANG Wei, QIAN Chengchun, et al. Research on boundary problem of the EMD method and Hilbert transform[J]. Science Bulletin, 2001(3):257.
- [9] HUANG D, ZHAO J, SU J. Practical implementation of Hilbert-Huang transform algorithm[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003(1):1.
- [10] ZHAO J P, HUANG D J. Mirror extending and circular spline function for empirical mode decomposition method[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2001, 2(3):247.
- [11] 杨建文, 贾民平. 希尔伯特-黄谱的端点效应分析及处理方法研究[J]. 振动工程学报, 2006, 2(19):283.
YANG Jianwen, JIA Minping. Study on processing method and analysis of end problem of Hilbert-Huang spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006(19):283.
- [12] DENG Y, WANG W, QIAN C. Boundary-processing-technique in EMD method and Hilbert transform[J]. Chinese Science Bulletin, 2001(1):954.

(收稿日期:2022-02-16)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998. tongji. edu. cn