

# 基于小波分析法的城市轨道交通轨面短波不平顺特征识别研究

房建<sup>1</sup>, 王雨晴<sup>1</sup>, 游日亮<sup>1</sup>, 杨敏超<sup>3</sup>, 邓远星<sup>1</sup>, 雷晓燕<sup>1</sup>, 练松良<sup>2</sup>

(1.华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013; 2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3.北京铁路电气化学校, 北京 102202)

**摘要:**城市轨道交通轨面短波不平顺现场实测数据常常表现出非平稳性, 本文利用具有多分辨率和自适应性的小波法针对非平稳轨面短波不平顺的局部特征、病害识别、轨道不平顺功率谱等方面展开研究。首先选取 Daubechies10 作为小波基函数, 对轨面短波不平顺波形特征进行识别; 利用 Daubechies10 小波对信号进行 10 层小波分解, 将分解后的细节信号和逼近信号进行功率谱分析, 得到不同波形对功率谱的贡献情况; 计算了高架线路和地下线路两种轨道型式的直线段和曲线段轨道接头区轨面短波不平顺小波功率谱。研究表明: 利用小波基函数可识别轨道短波不平顺波形局部特征; 由小波分解的逼近信号和细节信号可识别出轨道在 20.298 m 和 115.98 m 波长处存在较大不平顺; 将小波分解得到的逼近信号和细节信号进行功率谱分析, 对不同波长范围内特征不平顺的识别, 可以得到不同波形对功率谱的贡献情况。由小波变换法分别计算地下线路、高架线路直线段、曲线区段焊接接头区的小波谱, 并与 sato 谱和铁科院短波谱进行了对比。小波分析法可对轨面短波不平顺现场实测数据中不满足平稳性要求的数据进行处理分析, 为全面分析城市轨道交通轨面短波不平顺特征提供了较好的方法。

**关键词:** 城市轨道交通; 短波不平顺; 小波工具箱; 非平稳信号; 小波功率谱

中图分类号: U213

文献标志码: A

## Research on short-wave irregularity feature recognition of urban rail transit based on wavelet analysis method

Fang jian<sup>1</sup>, Wang Yuqing<sup>1</sup>, You Riliang<sup>1</sup>, Yang Mingchao<sup>3</sup>, Deng Yuanxing<sup>1</sup>, Lei Xiaoyan<sup>1</sup>, Lian Songliang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804, China;

3. Beijing Railway Electrification College, Beijing 102202, China)

**Abstract:** The on-site measured data of short-wave irregularities on urban rail transit track surfaces often exhibit non-stationary characteristics. In this paper, the wavelet method with multi-resolution and adaptability is used to study the local characteristics, disease identification and track irregularity power spectrum of non-stationary track surface short-wave irregularity. Firstly, Daubechies10 is selected as the wavelet basis function to identify the waveform characteristics of rail surface shortwave irregularity. The Daubechies10 wavelet is used to decompose the signal into 10 layers, and the power spectrum analysis of the decomposed detail signal and the approximate signal is carried out to obtain the contribution of different waveforms to the power spectrum. The wavelet power spectrum of short-wave irregularity of the rail surface in the joint area of the straight section and the curve section of the two track types of the elevated line and the underground line is calculated. The research demonstrates that wavelet basis functions can effectively identify local features of short-wave irregularity waveforms. Through the approximation and detail signals obtained from wavelet decomposition, significant irregularities at wavelengths of 20.298 m and 115.98 m were identified. Power spectrum analysis of these decomposed signals revealed the

---

contributions of different waveforms to the power spectrum across various wavelength ranges. The wavelet spectra of underground lines, elevated straight sections, and curved sections with welded joints were calculated using the wavelet transform method and compared with the Sato spectrum and the short-wave spectrum from the China Academy of Railway Sciences. The results indicate that the wavelet analysis method can effectively process non-stationary data, providing a robust approach for comprehensively analyzing the characteristics of short-wave irregularities on urban rail transit track surfaces.

**Key words:** rail transit; short wave irregularity; wavelet analysis; non-stationary signal; wavelet power spectrum

城市轨道交通的迅速发展在给人们带来便利的同时,也带来了一系列负面问题,尤其以振动、噪声问题最为突出<sup>[1]</sup>。作为轮轨不平顺重要组成部分的轨面短波不平顺是导致城市轨道交通产生振动、噪声问题的重要原因之一<sup>[2]</sup>。轨面短波不平顺幅值不大,但波长相对轨道中长波不平顺要小得多,当列车行驶在轨面上时,轨面短波不平顺通过轮轨接触产生轮轨高频冲击力,使得轮轨系统发生高频振动,进而激发下部基础结构振动,从而产生环境振动和噪声问题。

目前,国内外研究者针对轨道短波不平顺进行了广泛深入的研究。龚文静等<sup>[3]</sup>采用现场实测,重点考察了轨道短波不平顺的幅值特性及不平顺谱的分布特征。房建,李再帛等<sup>[4-5]</sup>利用现场实测的方法,分别对沪昆线路和上海轨道交通进行了测试。其中前者采用 1/3 倍频程和最大幅值法对所测沪昆线路数据进行分析,后者则是采用 ISO3095 标准对测试所得数据进行评价。王鹏等<sup>[6-7]</sup>采用直接测量法测得钢轨表面和车轮踏面的短波不平顺值,并对不平顺值进行评价。Alemi A 等<sup>[8-10]</sup>采用间接测量法得到了钢轨表面以及车轮踏面的短波不平顺并对其进行分析。

近年来,小波分析技术在轨道检测领域的应用得到了进一步拓展和深化,尤其在轮轨廓形平滑处理、轨道谱分析以及线形重构等方面。金锋等<sup>[11]</sup>研究表明采用 *coif5* 小波基进行多尺度分解能有效消除轨道检测数据中的趋势项,显著提升数据质量,为后续轨道谱精确分析奠定了基础。姜成英等<sup>[12]</sup>采用 *Sym8* 小波基的分段降噪方法,结合异常值剔除和边界延拓技术,有效消除了实测轮轨廓形中的噪声和畸变点。高鸿剑等<sup>[13]</sup>提出的基于小波阈值去噪的铁路线形重构方法,有效抑制了测点偏移噪声,提升了分段精度和重构效率。上述研究既丰富了小波分析在轨道检测中的应用场景,同时也为非平稳信号处理提供了更多技术选择。

冯兆伟等<sup>[14]</sup>通过将轨道短波不平顺实测数据输入到理论模型中,分析了轨道结构高频轮轨接触力及振动噪声的影响。段付佳<sup>[15]</sup>利用加窗傅里叶变换和小波分析法对轨道不平顺中的不利波形进行识别并进行了频谱分析,通过计算波形最值的方法对特征波形进行提取、定位和识别。现有的分析方法如 FFT 法、最大熵等方法都是将轨面短波不平顺数据假定为平稳性数据<sup>[16]</sup>,然而现场实测中的轨面短波不平顺数据往往表现出一定的非平稳性,模拟结果并不能完全反映轨道不平顺波形实际特性。在缺乏历史数据的情况下,刘文海等<sup>[17]</sup>提出的基于专家先验信息的预测方法能够较为准确地预测短期内轨道不平顺的发展趋势。为进一步研究非平稳轨面短波不平顺,本文选取 *Daubechies10* 作为小波基函数,对轨道短波不平顺波形特征进行识别、找到轨道短波不平顺病害所在处。利用 *Daubechies10* 小波对信号进行 10 层小波分解,将分解后的细节信号和逼近信号进行功率谱分析,得到不同波形对功率谱的贡献情况。计算了高架线路和地下线路两种轨道型式在直线段和曲线段轨道接头区轨面短波不平顺的小波功率谱,与铁科院短波谱和 *Sota* 谱进行比较分析。

## 1 小波分析基本原理

设 $\omega(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ,  $\omega(t)$ 为原始信号的母波函数, 具有紧支撑性和振荡性, 以捕捉轨面短波不平顺的局部特征, 对其进行傅里叶变换得到 $\varphi(\alpha)$ , 若 $\varphi(\alpha)$ 恒等分辨或者完全重构, 可表示为:

$$A_\omega = \int \frac{|\varphi(\alpha)|^2}{\alpha}, d\alpha < \infty \quad (1)$$

式中,  $A_\omega$ 为容许性常数, 保证小波变换的可逆性, 母波需满足零均值。对于任意函数 $g(t) \in L^2(T)$ 的小波序列公式为:

$$\omega_{c,d} = \frac{1}{c} \int g(t) \omega\left(\frac{t-d}{c}\right) dt \quad (2)$$

式中,  $\omega_{c,d}$ 为 $\omega(t)$ 做平移和缩放后得到的小波序列,  $c$ 为伸缩因子, 控制分析的波长范围,  $d$ 为平移因子, 定位不平顺的纵向位置。其逆变换为:

$$g(t) = \frac{1}{A_\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{c^2} \omega_{c,d} \omega\left(\frac{t-d}{c}\right) dc dd \quad (3)$$

由于实际中一般以离散方式对信号进行处理, 因此需要将小波序列离散化, 小波序列的离散化系数可表示为:

$$A_{i,k} = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \omega_{i,k}(t) dt \quad (4)$$

式中,  $\omega_{i,k}(t)$ 为离散化的小波序列,  $\omega_{i,k}(t) = c_0^{-\frac{i}{2}} \omega\left(\frac{t-kc_0^i d_0}{c_0^i}\right)$ ,  $i$ 为已知整数,  $k = d/(c_0^i d_0)$ 。其重构公式为:

$$g(t) = A \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} A_{i,k} \omega_{i,k}(t) \quad (5)$$

给定一个多分辨率分析以及相对应的尺度函数 $\omega(t)$ 和一个正交的二进小波函数 $\varphi(t)$ , 假设 $g(t) \in V_i$ ,  $i$ 是一个已知的整数, 根据多分辨率分析理论可以将 $g(t)$ 转换为:

$$g(t) = \sum_n \psi_i(n) \omega_{i,n}(t) + \sum_n \zeta_{i+1}(n) \varphi_{i+1,n}(t) \quad (6)$$

式中,  $\sum_n \zeta_{i+1}(n) \varphi_{i+1,n}(t)$ 为原始信号的连续逼近;  $\sum_n \psi_i(n) \omega_{i,n}(t)$ 为原始信号的连续细节。

## 2 轨道短波不平顺实测数据分析

### 2.1 轨道短波不平顺现场实测

采用波磨测量小车 CAT 对轨面短波不平顺进行实测<sup>[18]</sup>, 采样间隔为 0.002 m, 如图 1 所示。上行和下行测试区段的里程共约 50 km, 轨道结构类型为支撑块式轨道, 扣件为 DTIII-2 型, 道床为常规整体道床, 轨道短波不平顺实测数据如图 2 所示<sup>[19]</sup>。

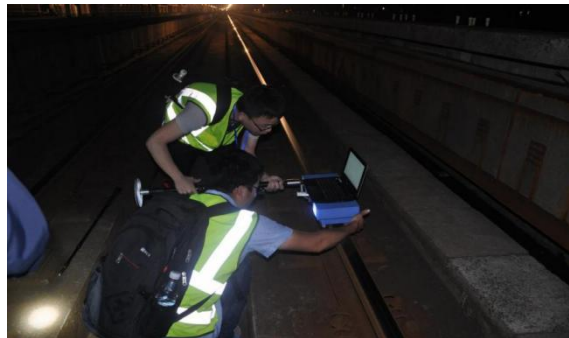


图 1 测试现场

Fig. 1 Data test site

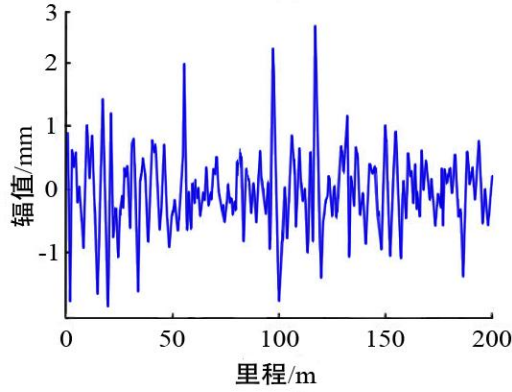


图2 不平顺波形

Fig. 2 Irregularity waveform

### 2.2 轨道短波不平顺波形局部特征识别

在对测试数据进行剔除趋势项、消除异常值、滤波以及平稳性判断等预处理的基础上<sup>[20]</sup>, 利用小波分析法对轨道短波不平顺波形局部特征进行识别<sup>[15]</sup>。由于 Daubechies10 高阶消失矩 (10 阶) 和紧支撑特性, 能有效捕捉损伤信号的高频奇异性<sup>[21]</sup>, 本文选用 Daubechies10 小波进行分解, 得到 10 个逼近信号图 (低频部分) 和 10 个细节信号图 (高频部分), 图 3 为信号小波分解图, 其中 s 为原始信号。

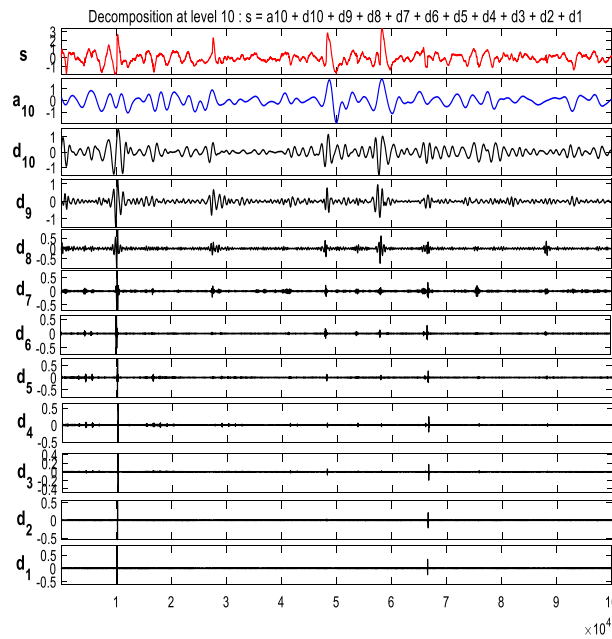


图3 不平顺信号分解图

Fig. 3 Irregularity signal decomposition diagram

尽管轨面短波不平顺是随机的, 但其波形具有类似的特征类型, 表 2 中列出了常见的 8 种波形以及可能发生的位置。

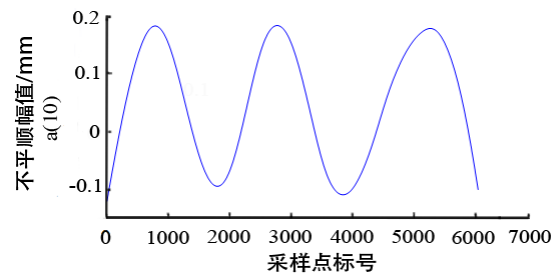
表 2 轨道不平顺特殊波形和常见发生位置<sup>[22]</sup>

Table 2 Special waveforms and common locations of track irregularity<sup>[22]</sup>

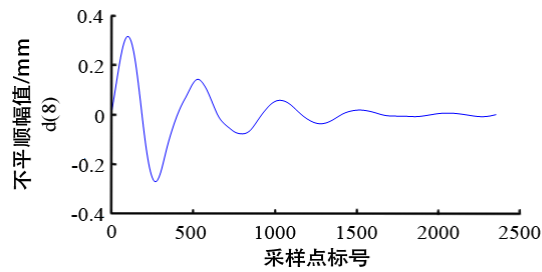
波形	常见发生位置
X 弯曲	局部软土点, 绝缘接头处

正弦波	缓和曲线, 软土点
台阶	桥梁, 平交道口处
圆弯	软土点, 冲刷处, 冒泥点, 平交道口处 <sup>[4]</sup>
指数衰减型	局部软土位置
槽口	软土点
S弯	桥梁, 道口处
尖弯	接头, 辙岔, 无缝钢轨的绝缘接头处, 桥墩

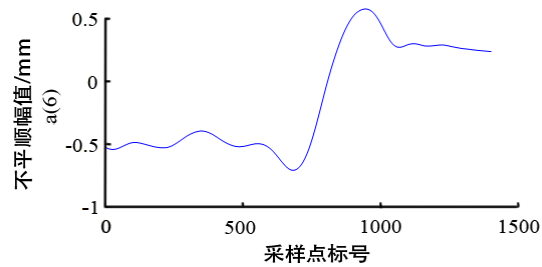
由图 3 表明, 所分解的轨道不平顺波形中存在特殊波形, 进一步分析各层逼近信号波形图和细节信号波形图, 发现轨道短波不平顺中存在正弦波形不平顺、指数衰减型波形不平顺、台阶 (迎轮错牙) 波形不平顺、余弦波形不平顺和三角波形不平顺, 如图 4 所示。



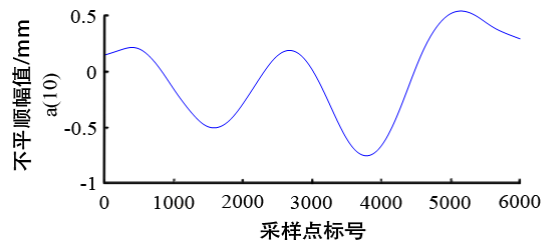
(a) 正弦波形图不平顺



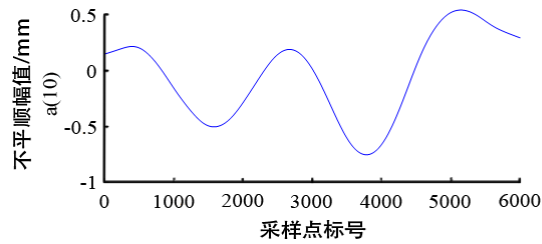
(b) 指数衰减型波形不平顺



(c) 台阶 (迎轮错牙) 波形不平顺



(d) 余弦波形不平顺



(e) 三角形波形不平顺

图 4 分解信号波形图

Fig. 4 The posing signal waveform map

基于小波分析法可将具有随机特性的轨道短波不平顺用一系列波形表示，对不同频率范围的不平顺层层分解，可由各层信号识别得到特殊不平顺波形。小波分解具有多分辨率特点，可将轨面短波不平顺按照一定的频率间隔范围进行分解。利用小波分解法，得到轨道短波不平顺各频率范围的频率结构，同时可以屏蔽各频率范围外轨道不平顺波形的影响，因而更容易识别出轨道不平顺中存在的有一定规律的波形，如指数衰减型波形不平顺、正弦波形不平顺、台阶（迎轮错牙）波形不平顺、余弦波形不平顺和三角波形不平顺等。

### 2.3 轨道短波不平顺病害的辨识

基于小波分析法对轨道短波不平顺高频部分有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率<sup>[23]</sup>，因此小波分析法对检测信号的自适应性可较好地识别轨面不平顺特征并对其进行分析。低频部分的逼近信号通常代表轨面较长波长的不平顺，如轨道整体变形或长期磨损；高频部分的细节信号通常代表轨面的局部变化和短波不平顺，如局部的磨损或不平顺等。

图 5 为 2.1 中对轨道短波不平顺数据进行小波分解得到的 10 个逼近信号波形图和 10 个细节信号波形图，可以看出，逼近信号 a(1)~a(7)和细节信号 d(1)~d(10)在 10150（即 20.298 m）处出现峰值；逼近信号 a(1)~a(10)和细节信号 d(8)、d(9)和 d(10)在 57991（即 115.98 m）处出现峰值。逼近信号和细节信号出现的峰值显示轨面平顺性可能存在缺陷。低频部分出现峰值，可能需要对轨道进行整体调整或加固；而高频部分的峰值表明需要进行局部的修复或维护。

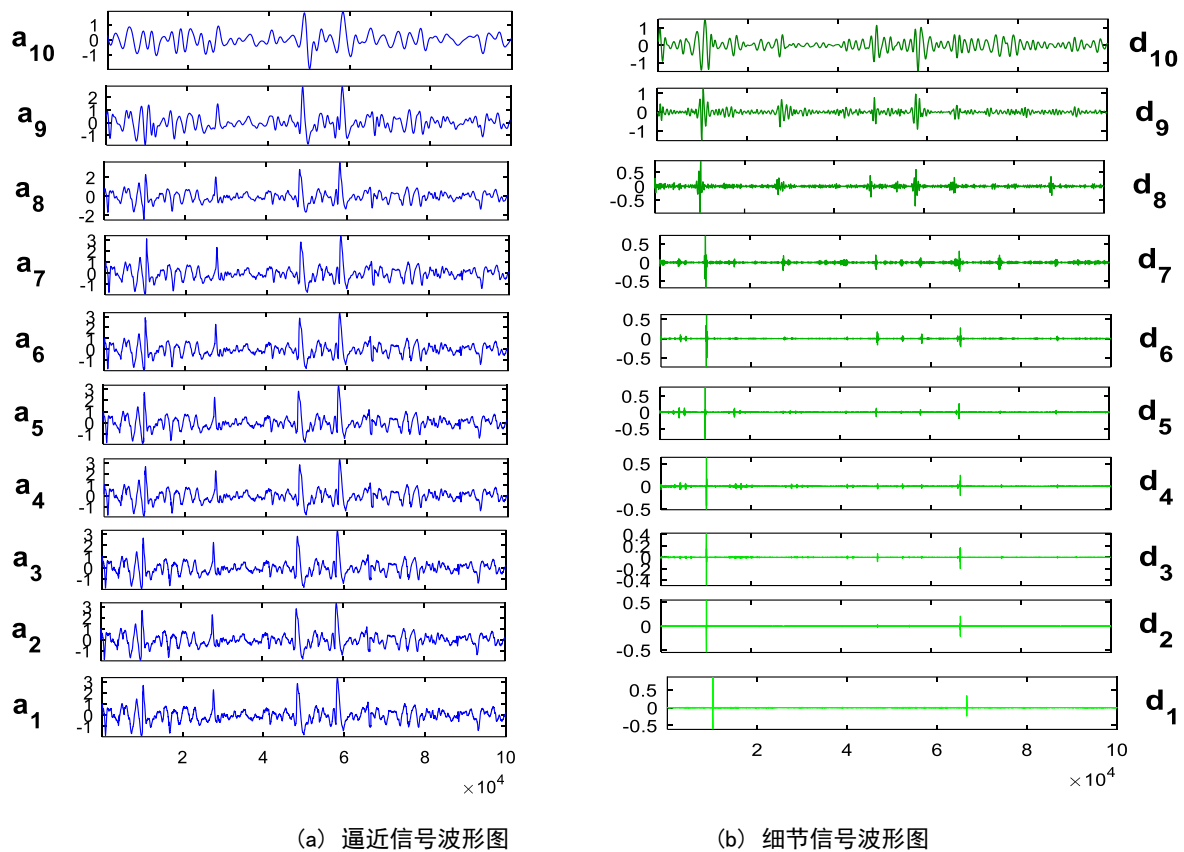


图 5 轨面短波不平顺小波分析结果

**Fig. 5 Analysis result of short wave irregularity of track surface**

通过小波分解可以识别并区分不同波长范围内不平顺的特征，将有助于确定养护维修需要关注的区域以及采取相应措施。

### 3 轨面短波不平顺的功率谱估计及分析

#### 3.1 轨面短波不平顺的功率谱分析

利用小波变换法对轨道交通 11 号线真如—枫桥路区段轨道短波不平顺数据进行分析计算，得到轨面短波不平顺小波功率谱，如图 6 所示。

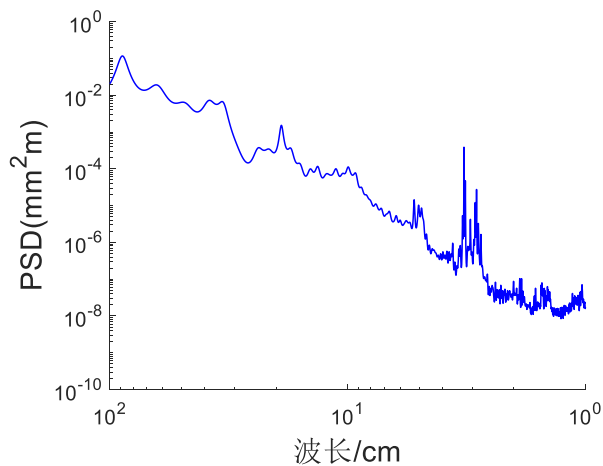
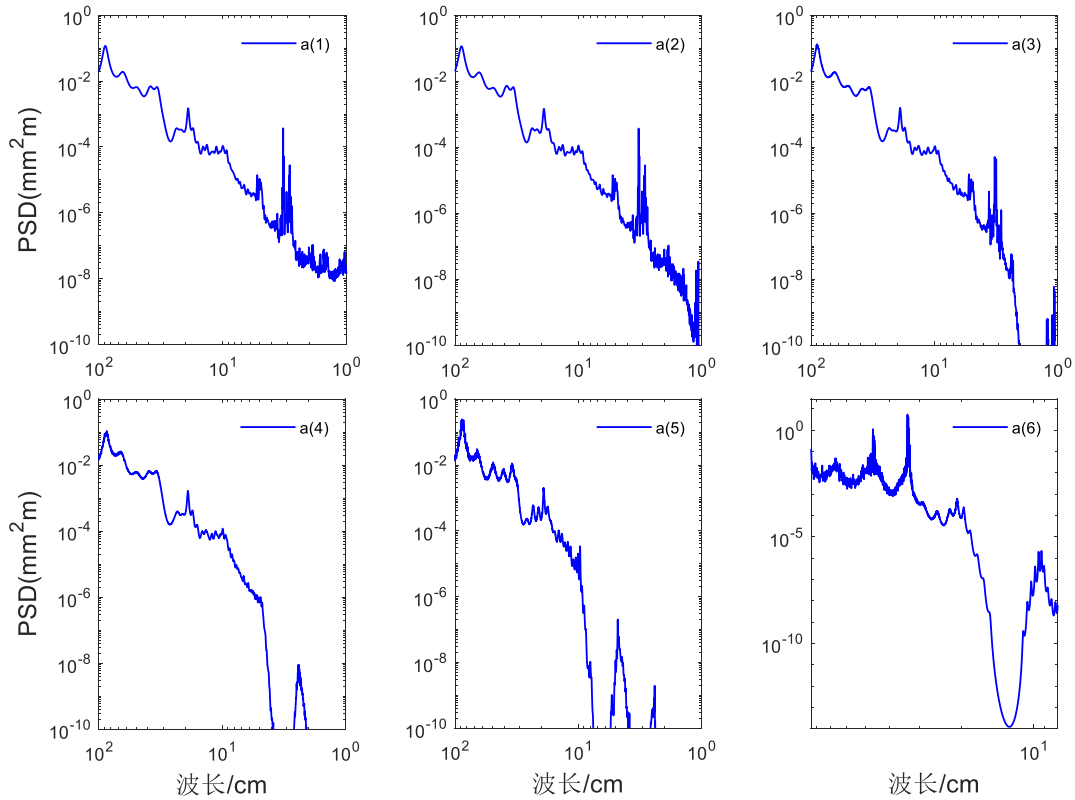


图 6 轨面短波不平顺检测信号功率谱

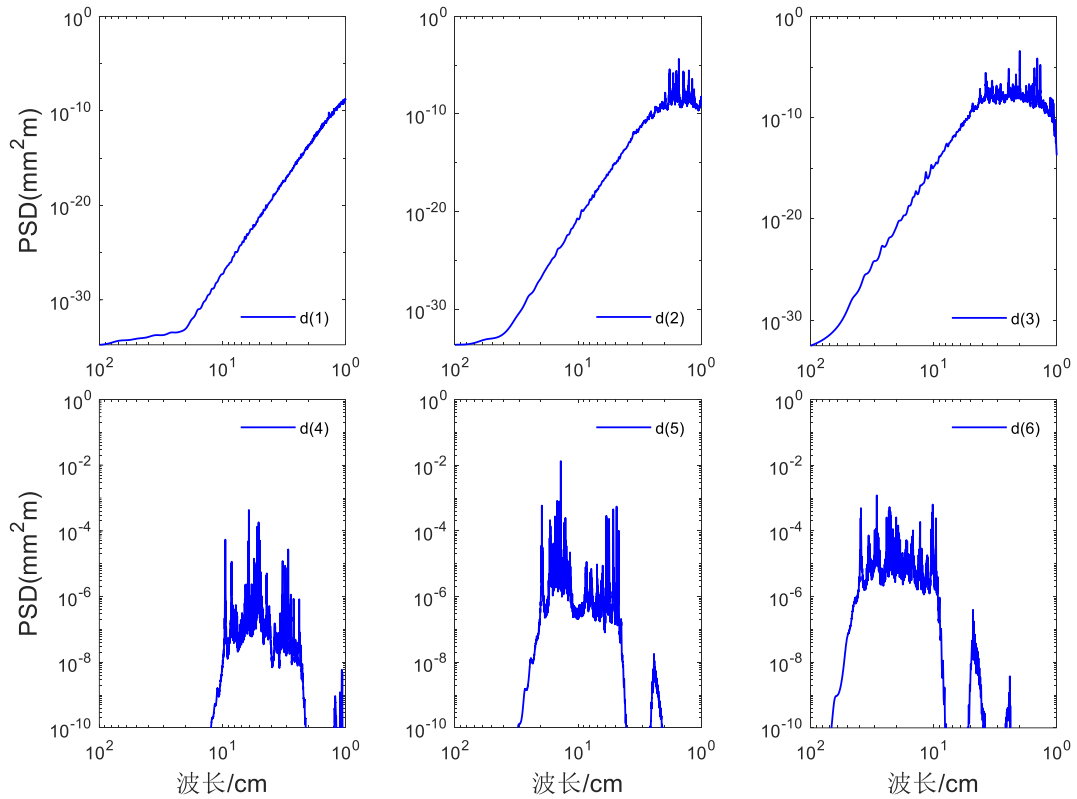
**Fig. 6 Track surface short-wave irregularities detection signal power spectrum**

由于波形之间相互影响，导致部分波形被掩盖或相互抵消以至于无法观测。为了清楚得到不同波形的贡献情况，本文采用 Daubechies10 小波对信号进行 6 层小波分解，将分解后的逼近以及细节信号进行功率谱分析，如图 7 所示。

从图7a中可以发现，a(1)和a(2)均反映了1~100 cm波长范围的功率谱密度值，在2.7~3.4 cm波长范围内，存在很多特征峰值，使功率谱曲线现出“毛刺”特征<sup>[2]</sup>，a(3)反映了2.5~100 cm波长范围的功率谱密度值，在3~3.6 cm波长范围内有很多特征峰值，从而使功率谱曲线呈现“毛刺”的特征；a(4)、a(5)和a(6)均展示了在短波范围内功率谱密度值大于 $10^{-10}$  mm<sup>2</sup>m的部分。从图8(b)中可以发现，细节信号d(1)、d(2)和d(3)在研究波长范围内功率谱密度值总体小于 $10^{-10}$  mm<sup>2</sup>m，其中d(2)反映了1~2 cm波长范围内的不平顺且在1.5 cm波长处有很多特征峰值，导致功率谱曲线呈现“毛刺”的特征，d(3)反映了1~4 cm波长范围内的不平顺且在2.1 cm波长处有很多特征峰值，从而使功率谱曲线呈现“毛刺”的特征；细节信号d(4)和d(6)分别说明了2~10 cm和、10~40 cm波长范围的波形功率谱密度值，d(5)反映了4~20 cm波长范围的波形功率谱密度值，其中13 cm波长处有很多特征峰值，从而使功率谱曲线呈现“毛刺”的特征。



(a) 逼近信号功率谱图



(b) 细节信号功率谱图

图7 轨面短波不平顺小波功率谱分析

**Fig. 7 Analysis of short-wave irregularity and wavelet power spectrum on the orbital surface**

将原始检测信号通过小波分解得到细节信号和逼近信号，分别对细节信号和逼近信号进行分析，可知轨面特征不平顺。利用小波分析法可区得到钢轨轨面不同特征的不平顺波形，为进一步分析城市轨道交通轨面短波不平顺特征提供了参考。

### 3.2 直线区段焊接接头轨面短波不平顺功率谱特性研究

利用小波变换法对上海轨道交通 11 号线轨面短波不平顺数据小波分解后进行功率谱分析，计算得到高架线路、地下线路直线段焊接接头区小波功率谱，并与铁科院短波谱（简称短波谱）和 Sato 粗糙度谱（简称粗糙度谱）进行比较，如图 8 所示。

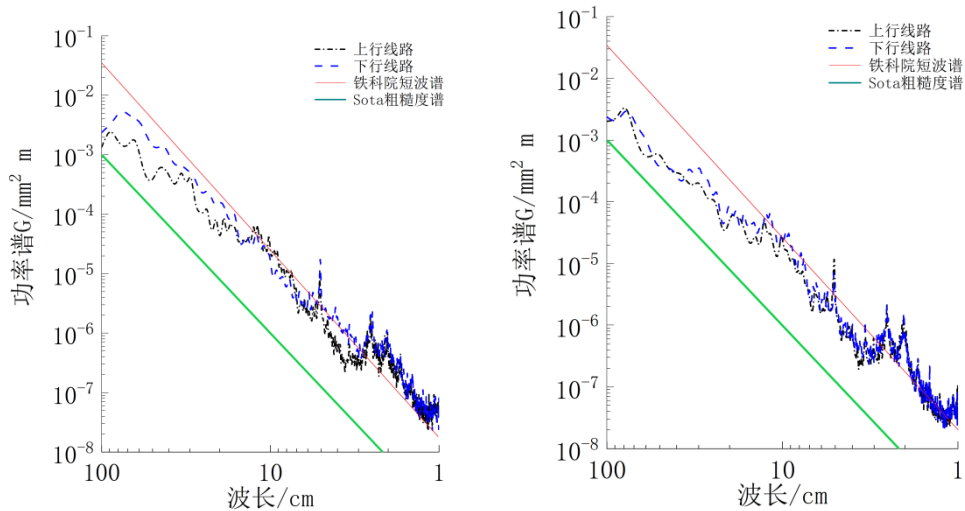


图 8 直线焊接接头区小波功率谱

Fig. 8 Linear section welding joint region wavelet power spectrum

图 8 表明, 直线段焊接接头区小波功率谱在 6~100 cm 波长范围内随波长减小而减小, 高架区段、地下区段的上、下行线路轨面短波不平顺功率谱值以及分布规律接近, 表明上、下行线路短波不平顺状态相接近。将高架线路、地下线路直线段焊接接头区的轨面短波功率谱密度 (PSD) 分别与 Sato 粗糙度谱、铁科院短波谱进行对比: 在分析波长范围内, 两类线路焊接接头区的功率谱密度均显著高于 Sato 粗糙度谱; 在 1~15 cm 波长范围内, 高架线路焊接接头区的功率谱密度与短波谱基本相当, 在 15~100 cm 波长范围内明显低于短波谱; 地下线路焊接接头区在 1~13 cm 波长范围内接近于铁科院短波谱, 在 13~100 cm 波长范围低于短波谱。

### 3.3 曲线区段焊接接头区轨面短波不平顺功率谱特性研究

基于小波变换原理, 对上海轨道交通 11 号线轨面短波不平顺数据进行分解, 计算得到高架线路、地下线路曲线段焊接接头区小波功率谱密度。并与铁科院短波谱 (简称短波谱) 和 Sato 粗糙度谱 (简称粗糙度谱) 进行比较, 如图 9 所示。

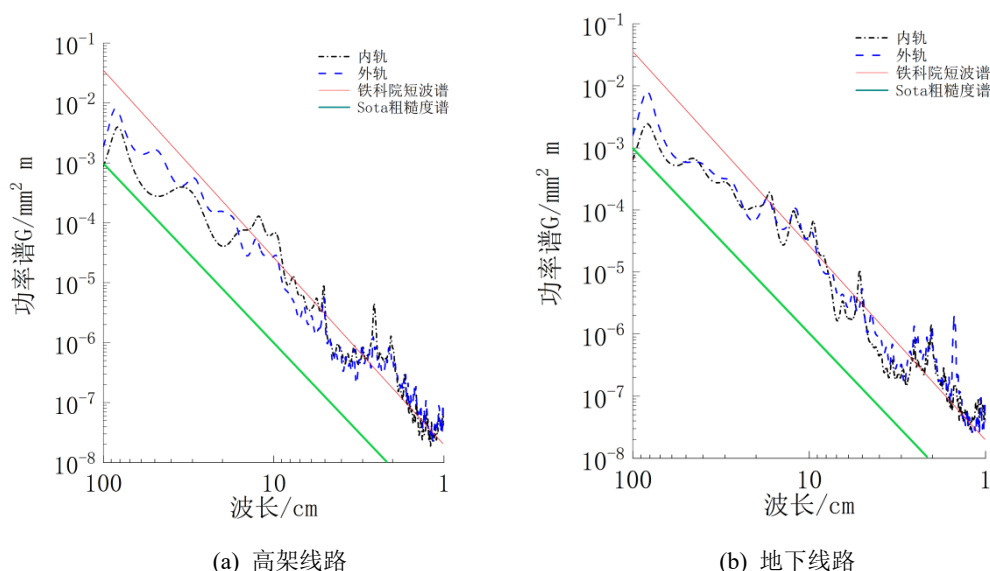


图 9 曲线焊接接头区小波功率谱

Fig. 9 Curve section welding joint area wavelet power spectrum

图 9 表明, 曲线段焊接接头区小波功率谱在 20~100 cm 波长范围内随波长减小而减小, 其中高架线路、地下线路内、外轨的轨面短波不平顺功率谱相差不大<sup>[2]</sup>。通过与粗糙度谱以及短波谱进行比较可知, 在分析波长范围内高架线路、地下线路曲线段焊接接头区不平顺功率值均高于 Sato 粗糙度谱; 针对曲线段焊接接头区, 分析表明: 高架线路轨面短波功率谱在 1~30 cm 波长范围内接近短波谱, 但在 30~100 cm 波长范围内要低于短波谱; 地下线路在 1~19 cm 波长范围内与短波谱接近, 而在 19~100 cm 波长范围要低于短波谱。

Sato 谱与铁科院短波谱虽源于大铁路, 但其波长-功率谱关系为轨道不平顺的通用评价标准。通过对比可验证小波分析法在短波范围内的普适性, 同时揭示城市轨道交通的特殊性: 地下线路因环境封闭, 短波不平顺功率谱在高频段 ( $<15$  cm) 更显著; 高架线路因温度变形影响, 中长波 (30~100 cm) 功率谱低于

大铁路谱值。此差异为城市轨道定制化养护提供了依据。

## 4 结论

本文利用小波分析法对上海轨道交通 11 号线部分线路轨面短波不平顺实测数据进行了轨道不平顺的局部特征、病害识别、轨道不平顺功率谱等方面进行了研究，主要研究结论如下：

1) 小波分析法将具有随机特性的轨面短波不平顺用一系列波形表示，对不同频率范围的不平顺层层分解，从而由各层信号分析得到特殊不平顺波形。

2) 小波分析法对检测信号的自适应性可较好地识别轨面不平顺特征并对其进行分析。轨面短波不平顺实测数据通过小波分解得到逼近信号和细节信号<sup>[24]</sup>，如果逼近信号出现波动或峰值，可能需要对轨道进行整体调整或加固；而高频成分的峰值表明需要进行局部的修复或维护。小波分解技术能够区分和识别不同波长范围内的轨道不平顺特征，从而有助于确定养护维修需要关注的区域以及所采取的相应措施。

3) 对小波分解生成的逼近信号和细节信号进行功率谱分析，通过对不同波长范围内特征不平顺的识别，得到不同波形对功率谱的贡献情况。

4) 利用小波变换法分别计算高架线路、地下线路直线段、曲线区段焊接接头区的小波谱，在 1~100 cm 波长范围内地下线路、高架线路直线段和曲线段焊接接头区不平顺功率谱值均高于 Sato 粗糙度谱；高架线路焊接接头区轨面短波不平顺功率谱在 1~15 cm 波长范围内和 1~30 cm 波长范围内与铁科院短波谱接近，在 15~100 cm、30~100 cm 波长范围内低于铁科院短波谱；地下线路焊接接头区轨面短波不平顺功率谱在 1~13 cm 波长范围内和 1~19 cm 波长范围内与铁科院短波谱接近，在 13~100 cm 波长范围内和 19~100 cm 波长范围内低于铁科院短波谱。

## 参考文献：

- [1] 韦智敏.城市高架轨道结构高频振动及其传递特性影响研究[D].华东交通大学,2023.  
WEI Z M. Study on high frequency vibration of urbanelevated track structure and its influence ontransmission characteristics[D]. East China Jiaotong University, 2023.
- [2] 房建, 王宏轩, 郑稳稳, 等. 城市轨道交通轨面短波不平顺谱实测研究[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(01): 96-105.  
FANG J, WANG H X, ZHENG W W, et al. Research on short-wave irregularity spectrum of urban rail surface[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(01): 96-105.
- [3] 龚文静. 高速铁路II型板无砟轨道结构病害分析与治理质量评价[D]. 中南大学,2023.  
GONG W J. Structural disease analysis and treatment quality evaluationof Type II plate ballastless track of high-speed railway[D]. Central South University, 2023.
- [4] 房建, 郑稳稳, 雷晓燕, 等. 提速线路钢轨轨面短波不平顺实测分析[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(11): 34-40.  
FANG J, ZHENG W W, LEI X Y, et al. Analysis of Rail Short-wave Irregularity of the Speed Increased Tracks[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(11): 34-40.
- [5] 李再伟, 雷晓燕, 高亮. 轨道短波不平顺数值模拟新方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(01): 37-45.  
LI Z W, LEI X Y, GAO L. New numerical simulation method of shortwave track irregularity[J]. Journal of Traffic and

---

Transportation Engineering, 2016, 16(01): 37-45.

- [6] 王鹏, 陶功权, 杨晓璇, 等. 中国高速列车车轮多边形磨耗特征分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(06): 1357-1365.  
WANG P, TAO G Q, YANG X X, et al. Analysis of Polygonal Wear Characteristics of Chinese High-Speed Train Wheels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(06): 1357-1365.
- [7] Yang Y, Ling L, Liu P, et al. Experimental investigation of essential feature of polygonal wear of locomotive wheels[J]. Measurement, 2020, 166
- [8] Alemi A, Corman F, Pang Y, et al. Reconstruction of an informative railway wheel defect signal from wheel - rail contact signals measured by multiple wayside sensors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit, 2019, 233(1): 49-62.
- [9] Sun Q, Chen C, Kemp A H, et al. An on-board detection framework for polygon wear of railway wheel based on vibration acceleration of axle-box[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153: 107540.
- [10] Reitmann E, Fröhling R D, Hettasch G. Identification and monitoring of polygonised railway wheels using existing wheel impact monitoring measurement data[C]. // Proceedings of the 11th international heavy haul association conference (IHHA 2017), Cape Town, South Africa. 2017: 2-6.
- [11] 金锋, 肖宏, 崔旭浩. 基于 Burg 法的城市轨道交通快速线路轨道不平顺谱研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(04): 99-106.  
JIN F, XIAO H, CUI X H. Study on Track Irregularity Spectrum of Fast Urban Rail Transit Line Based on Burg Method[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(04): 99-106.
- [12] 姜成英, 罗仁. 轮轨实测廓形小波平滑方法及其对蛇行运动影响[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(03): 1-8.  
JIANG C Y, LUO R. Wavelet Smoothing Method for Measured Wheel/Rail Profiles and Its Influences on Hunting[J]. Railway Locomotive & Car, 2023, 43(03): 1-8.
- [13] 高鸿剑, 缪鹏. 基于小波去噪的既有铁路平面重构方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3600-3611.  
GAO H J, MIAO K. A method for recreating horizontal alignment of existing railway based on wavelet denoising[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3600-3611.
- [14] 冯兆伟, 罗文俊, 郭文杰, 等. 基于 FE-SEA 法的上盖建筑宽频段振动噪声分析与控制[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-12[2024-07-28].  
FENG Z W, LUO W J, GUO W J, et al. Analysis and control of wide-band vibration and noise of roof building based on FE-SEA method[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 1-12[2024-07-28].
- [15] 段付佳. 轨道不平顺测量方法及其频谱分析[D]. 西南交通大学, 2019.  
DUAN F J. Measurement method of track irregularity and its spectrum analysis[D]. Southwest Jiaotong University, 2019.
- [16] 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(08): 3344-3350.  
XU L, CHEN X M, XU W C, 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(08): 3344-3350.
- [17] 刘文海, 李再帏, 何越磊. 基于专家先验信息的轨道不平顺预测研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(03): 24-32.  
LIU W H, LI Z W, HE Y L. Research on Track Irregularity Prediction Based on Expert Prior Information[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(03): 24-32.
- [18] 杨哲, 雷晓燕, 刘庆杰, 等. 小半径曲线地段钢轨波磨对于地面振动影响的测试分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(01):

---

182-186.

YANG Z, LEI X Y, LIU Q J, et al. Test and Analysis of Influence of Rail Corrugation on Ground Vibration of Curved Tracks[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(01): 182-186.

[19] 刘丹,张大伟,宋宏图,等.重载铁路钢轨焊接不平顺对道床动力特性的影响[J].中国铁道科学,2024,45(04):1-11.

LIU D, ZHANG D W, SONG H T, et al. Research on Dynamic Characteristics of Heavy-Haul Railway Ballast Bed Effected by Rail Weld Irregularity[J]. China Railway Science, 2024, 45(04): 1-11.

[20] 房建,涂祥国,王宏轩,等.提速线路轨道不平顺谱拟合方法[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023, 36(02): 82-88.

FANG J, TU X G, WANG H X, et al. Study on Track Irregularity Spectrum Characteristics of Speed-up Lines[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University( Natural Science Edition) , 2023, 36(02): 82-88.

[21] 薛祥, 霍达, 滕海文. 桥梁损伤识别的小波空间变换及基函数选取的理论探讨[J]. 河南科学, 2005, (06): 144-148.

XUE X, HUO D, TENG H W. The theoretic analysis about Spatial Wavelet transform of Engineering Structure damage Identification and which wavelet was chosen[J]. Henan Science, 2005, (06): 144-148.

[22] 陈宪麦. 轨道不平顺时频域分析及预测方法的研究[D]. 铁道部科学研究院, 2006.

CHEN X M. Time-frequency analysis and prediction study on track irregularities[D]. 铁道部科学研究院, 2006.

[23] 陈宪麦, 王澜, 陶夏新, 等. 基于小波分析理论的轨道不平顺分析[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(1): 57-61, 71.

CHEN X M, WANG L, TAO X X, et al. Analysis of Track Irregularity with Wavelets Analysis Theory[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(1): 57-61, 71.

[24] 谢建. 电气化铁路接触网不平顺分析及功率谱研究[D]. 西南交通大学, 2010.

XIE J. Analysis and power spectrum research on catenary irregularities of electric railway[D]. Southwest Jiaotong University, 2010.



通信作者：房建（1978—），女，副教授，博士，硕士生导师，研究方向为轨道动力学、轨道结构动力学特性测试分析。