

文章编号:1005-0523(2026)04-0027-10



基于小波法的城市轨道短波不平顺特征识别

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

(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,文章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。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115.980 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。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

本文引用格式:房建,王雨晴,游日亮,等.基于小波法的城市轨道短波不平顺特征识别[J].华东交通大学学报,2026,43(4):27-36.

Characterization of Short-Wave Irregularities on Urban Rail Transit Tracks Based on the Wavelet Method

Fang Jian¹, Wang Yuqing¹, You Riliang¹, Yang Minchao³, Deng Yuanxing¹, Lei Xiaoyan¹, Lian Songliang²

(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 often exhibit non-stationary on urban rail transit track surfaces. This paper employs the wavelet method with multi-resolution and adaptivity is used to study the local characteristics, defect identification and track irregularity power spectrum of non-stationary track surface short-wave irregularity. Daubechies10 is selected as the wavelet basis function to identify the waveform characteristics of rail surface shortwave irregularity. Using the Daubechies10 wavelet, the signal is decomposed into 10 layers, and the power spectrum analysis of the decomposed detail signal and the approximation 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

收稿日期:2025-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51668019);江西省自然科学基金项目(20171BAB206057)

two track types of the elevated line and the underground line are calculated. The results demonstrate 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 results indicate that the wavelet analysis method can effectively process non-stationary data, providing a robust approach to comprehensively analyze the characteristics of short-wave irregularities on urban rail transit track surfaces.

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

Citation format: Fang Jian, Wang Yuqing, You Riliang, et al. Characterization of short-wave irregularities on urban rail transit tracks based on the wavelet method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 27-36.

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^[1]。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^[2]。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,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^[3-8]。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^[9],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。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,也为非平稳信号处理提供了更多技术选择。金锋等^[10]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。高鸿剑等^[11]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。段付佳^[12]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。在缺乏历史数据的情况下,刘文海等^[13]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特性,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。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。

1 小波分析基本原理

设 $\varpi(t) \in L^2(R)$, $\varpi(t)$ 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

$$A_{\varpi} = \int \frac{|\varphi(\alpha)|^2}{\alpha} d\alpha \quad (1)$$

式中: A_{ϖ} 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

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

式中: 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

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

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

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

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

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

给定一个多分辨率分析以及相对应的尺度函数 $\varpi(t)$ 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

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

式中: $\sum_n \varsigma_{i+1}(n) \varphi_{i+1,n}(t)$ 为原始信号的连续逼近; $\sum_n \psi_i(n) \varpi_{i,n}(t)$ 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,采样间隔为0.002 m。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1所示。

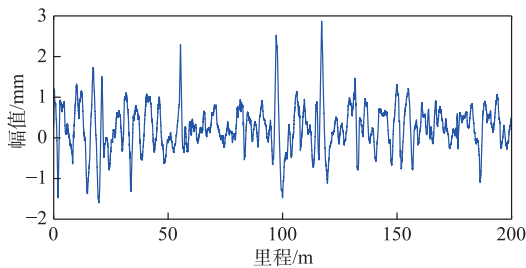


图1 不平顺波形图

Fig. 1 Irregularity waveform diagram

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^[14],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。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^[15],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2为信号小波分解图,其中 s 为原始信号。

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1列出了常见的8种波形以及可能发生的位置。

图2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3所示。

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,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4为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 $a_1 \sim a_{10}$ 和细节信号 $d_1 \sim d_{10}$ 在采样点序号10 150(即20.298 m)处出现峰值;逼近信号

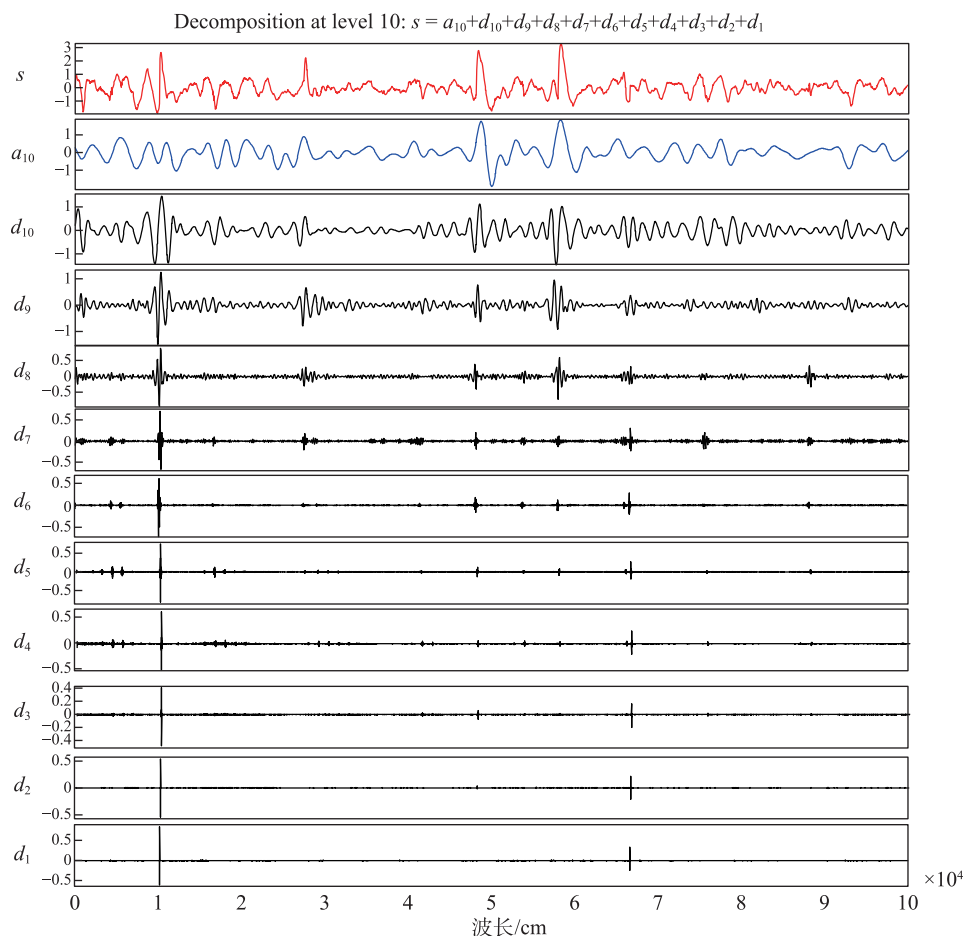


图2 不平顺信号分解图

Fig. 2 Irregularity signal decomposition diagram

表1 轨道不平顺特殊波形和常见发生位置

Tab. 1 Special waveforms and common locations of track irregularity

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 ^[14]
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

$a_1 \sim a_{10}$ 和细节信号 d_8 、 d_9 和 d_{10} 在采样点序号57 991(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。

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 基于小波多分辨率分解的短波不平顺功率谱估计

利用小波变换法对轨道交通11号线真如一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5所示。

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6所示。

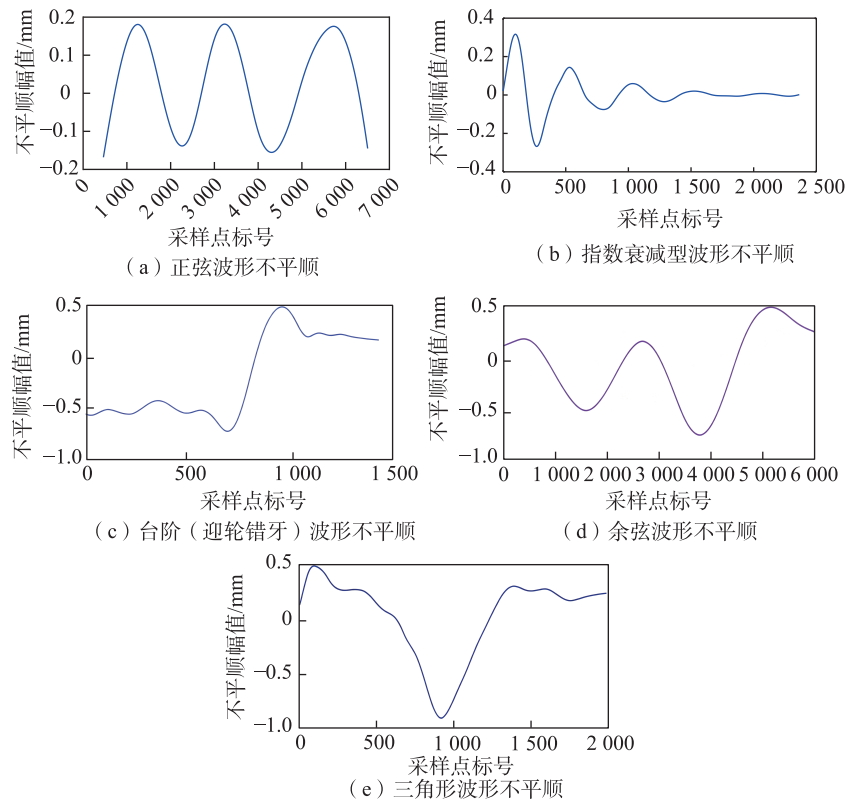


图3 分解信号波形图

Fig. 3 Decomposed signal waveform diagram

从图6(a)、图6(b)和图6(c)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^[2], a_3 反映了2.5~100 cm波长范围的功率谱密度值,在3.0~3.6 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。从图6(d)、图6(e)、图6(f)可以看出, 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 $10^{-10} \text{ mm}^2 \cdot \text{m}$ 的部分。从图6(g)、图6(h)、图6(i)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 $10^{-10} \text{ mm}^2 \cdot \text{m}$,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。从图6(j)、图6(k)、图6(l)中可以看出,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。

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分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 直线区段焊接接头短波不平顺功率谱与标准谱的对比分析

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7所示。

图7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(简称粗糙度谱)、铁科院短波谱(简称短波

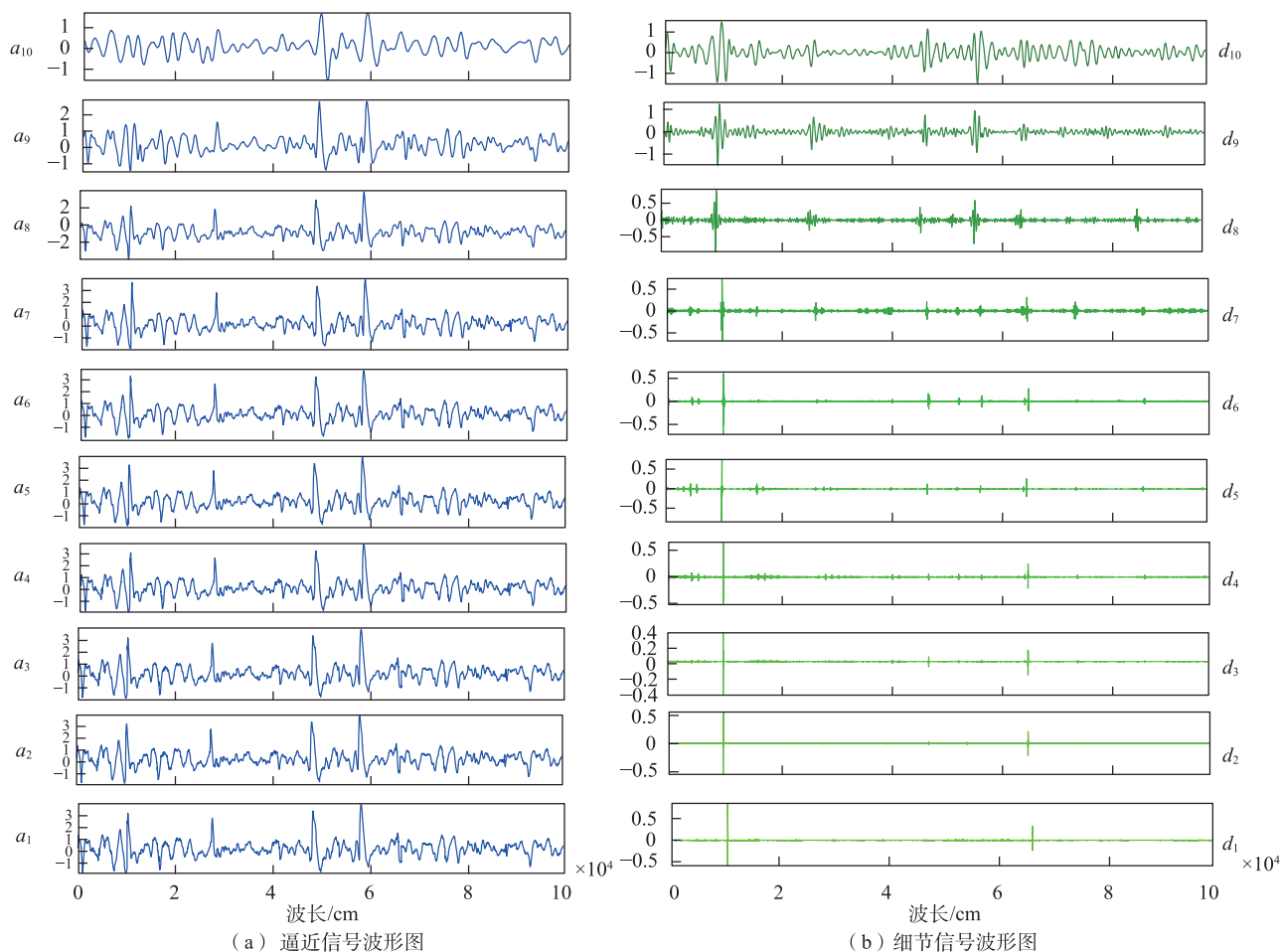


图4 轨面短波不平顺小波分析结果

Fig. 4 Analysis result of short wave irregularity of track surface

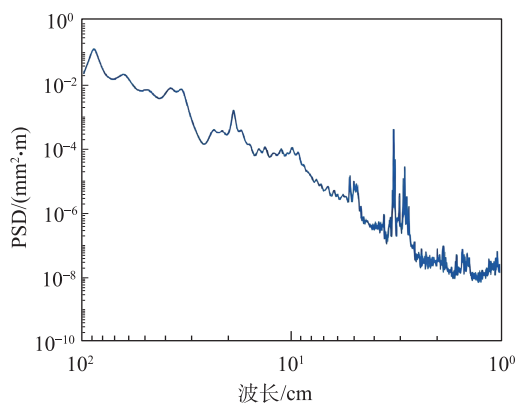


图5 轨面短波不平顺检测信号功率谱

Fig. 5 Track surface short-wave irregularities detection signal power spectrum

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 曲线区段焊接接头短波不平顺功率谱与标准谱的对比分析

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。并与铁科院短波谱和Sato粗糙度谱进行比较,如图8所示。

图8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^[2]。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粗糙度谱。

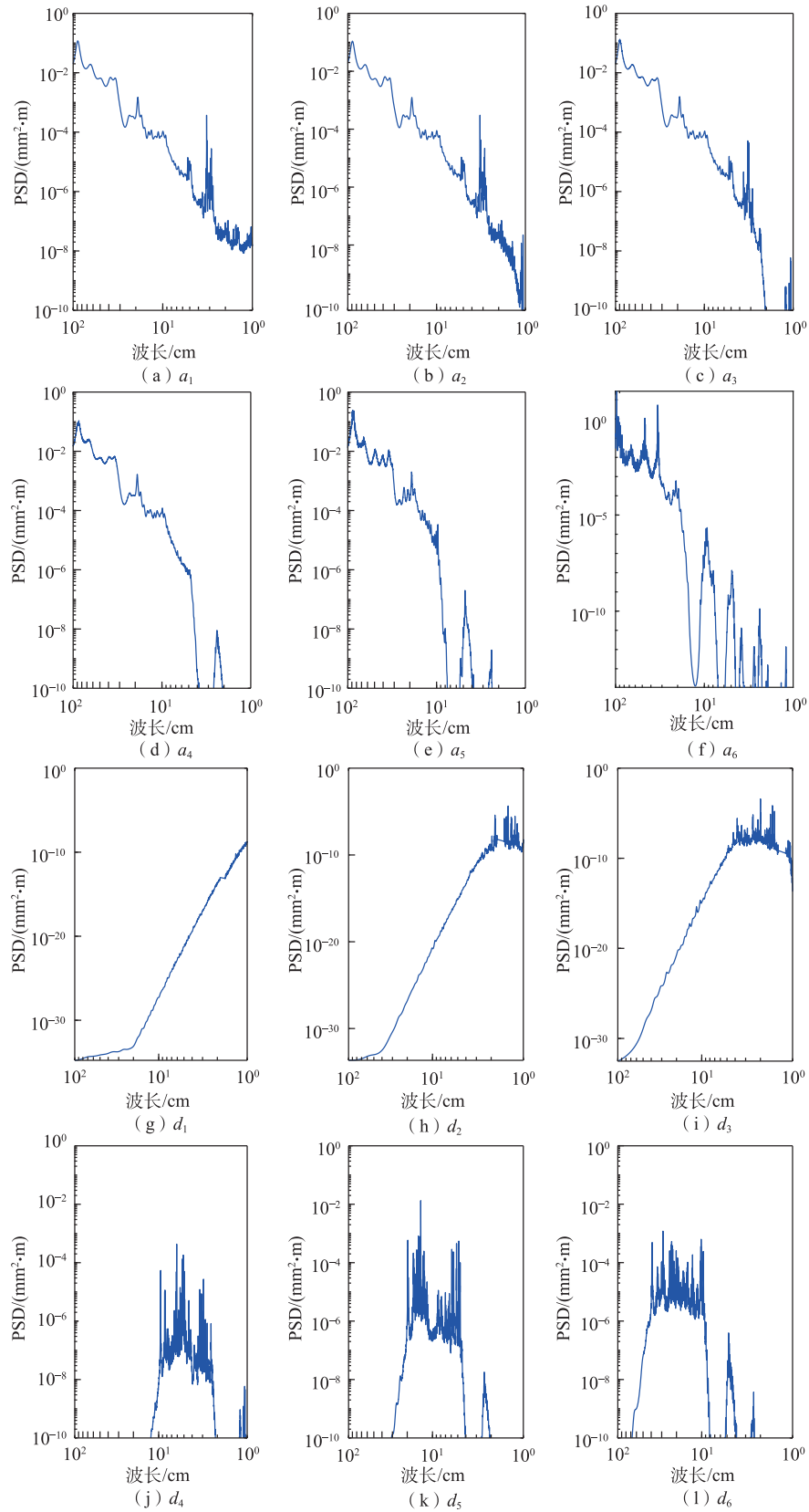


图6 轨面短波不平顺小波功率谱分析

Fig. 6 Analysis of short-wave irregularity and wavelet power spectrum on the orbital surface

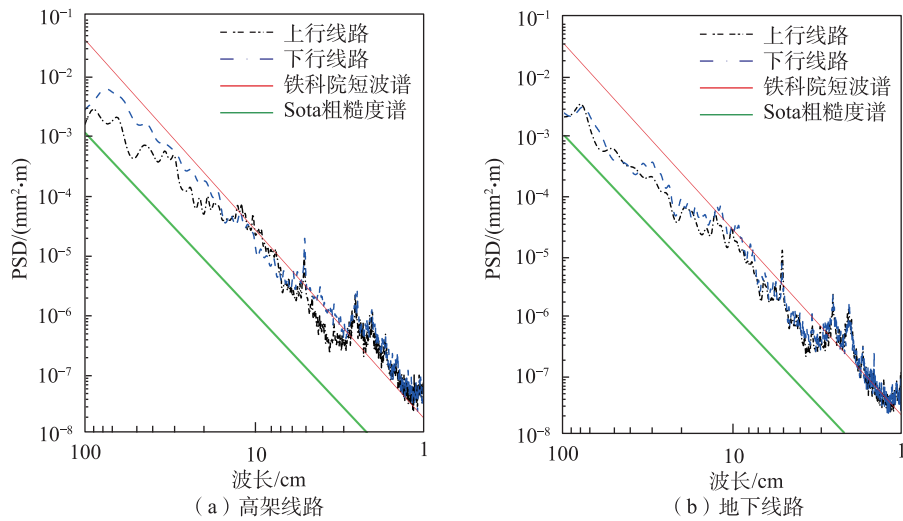


图7 直线段焊接接头区功率谱与标准谱对比

Fig. 7 Comparison of power spectrum of welded joint zone in straight track section with standard spectra

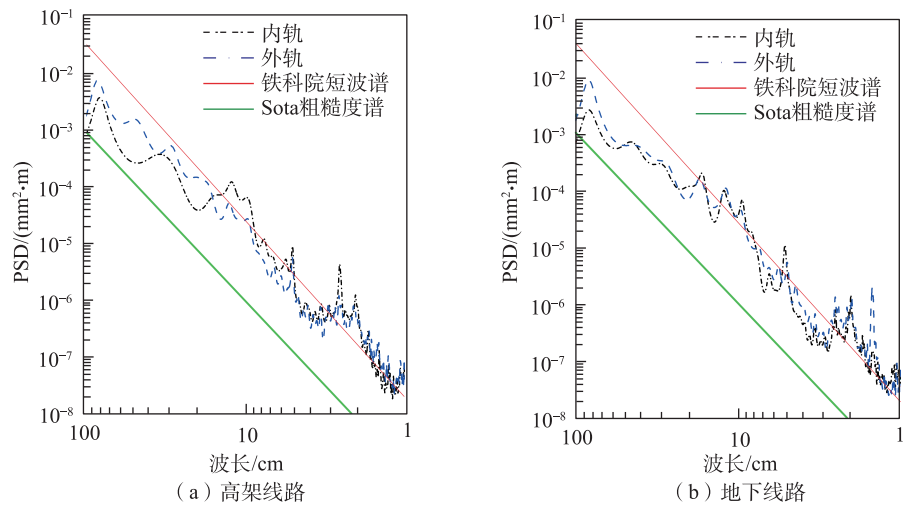


图8 曲线段焊接接头区功率谱与标准谱对比

Fig. 8 Comparison of power spectrum of welded joint zone in curved track section with standard spectra

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。此差异为城市轨道交通定制化养护提供了依据。

4 结论

本文利用小波分析法,以上海轨道交通11号线部分线路的轨面短波不平顺实测数据为研究对象,围绕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开展研究,主要结论如下。

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) 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,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和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]. 南昌:华东交通大学,2023.
Wei Zhimin. Study on high frequency vibration of urban elevated track structure and its influence on transmission characteristics [D]. Nanchang: 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(1):96-105.
Fang Jian, Wang Hongxuan, Zheng Wenwen, et al. Research on short-wave irregularity spectrum of urban rail surface[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(1):96-105.
- [3] 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 Jian, Zheng Wenwen, Lei Xiaoyan, et al. Analysis of rail short-wave irregularity of the speed increased tracks[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(11):34-40.
- [4] 李再玮,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(1):37-45.
Li Zaiwei, Lei Xiaoyan, Gao Liang. New numerical simulation method of shortwave track irregularity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1):37-45.
- [5] 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]. 土木与环境工程学报(中英文),2025,47(5):218-228.
Feng Zhaowei, Luo Wenjun, Guo Wenjie, et al. Analysis and control of wide-band vibration and noise of roof building based on FE-SEA method[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(5):218-228.
- [6] 沈龙江,田春香,贺世忠,等. 城市轨道交通轨面短波不平顺特性分析[J]. 铁道工程学报,2024,41(10):24-30.
Shen Longjiang, Tian Chunxiang, He Shizhong, et al. Analysis of short-wave irregularity characteristics of urban rail transit track surface[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(10):24-30.
- [7] 徐舟,从建力,赵铭洋,等. 基于3m波长地铁钢轨焊缝接头不平顺的轮轨响应分析[J]. 铁道标准设计,2024,68(2):52-59,67.
Xu Zhou, Cong Jianli, Zhao Mingyang, et al. Wheel-rail response analysis based on the irregularity of 3 m wavelength metro rail weld joint [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(2):52-59,67.
- [8] 赵鑫,黄双超,杨吉忠,等. 更高速下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为及中/短波不平顺临界限值研究[J]. 铁道学报,2024,46(10):21-32.
Zhao Xin, Huang Shuangchao, Yang Jizhong, et al. On transient wheel-rail rolling-sliding-jumping contact and critical sizes of short/medium-wave irregularities at higher speeds [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(10):21-32.
- [9] 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.
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.
- [10] 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(4):99-106.
Jin Feng, Xiao Hong, Cui Xuhao. Study on track irregu-

- larity spectrum of fast urban rail transit line based on Burg method[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(4): 99-106.
- [11] 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 Hongjian, Miao Kun. 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.
- [12] 段付佳. 轨道不平顺测量方法及其频谱分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Duan Fujia. Measurement method of track irregularity and its spectrum analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] 刘文海, 李再伟, 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(3): 24-32.
Liu Wenhai, Li Zaiwei, He Yuelei. Research on track irregularity prediction based on expert prior information[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 24-32.
- [14] 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(2): 82-88.
Fang Jian, Tu Xiangguo, Wang Hongxuan, et al. Study on track irregularity spectrum characteristics of speed-up lines[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2023, 36(2): 82-88.
- [15] 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 Xianmai, Wang Lan, Tao Xiaxin, et al. Analysis of track irregularity with wavelets analysis theory[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(1): 57-61, 71.



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。
E-mail: 83615342@qq.com。

(责任编辑: 吴海燕)