

文章编号:1671-1637(2016)01-0037-09

轨道短波不平顺数值模拟新方法

李再伟^{1,2,3}, 雷晓燕², 高亮³

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013; 3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:针对轨道短波不平顺问题,提出了一种基于离散二进制小波的轨道短波不平顺数值模拟方法,将ISO 3095标准谱作为目标函数,得到了ISO 3095标准谱和小波系数的关系,给出了数值模拟算法流程与步骤,并将数值模拟结果与上海某段地铁实测结果进行了对比分析。分析结果表明:合适的小波分解层数为8层,最低层包含的波长范围为512~1 024 mm;短波不平顺数值模拟时域波形符合实际轨道短波不平顺的统计特征,呈现非平稳性,幅值分布范围为-0.15~0.15 mm;数值模拟结果与ISO 3095标准谱之间存在的差异由倍频程采样间隔与三分之一倍频程采样间隔的差异造成。可见,采用二进制小波变换可以有效实现轨道短波不平顺的数值模拟,模拟结果与实测结果在幅值和细部波形方面略有差别,建议对轨道短波不平顺进行大量的测量与统计分析。

关键词:地铁轨道;小波变换;三分之一倍频程分析;短波不平顺;数值模拟

中图分类号:U216.3

文献标志码:A

New numerical simulation method of shortwave track irregularity

LI Zai-wei^{1,2,3}, LEI Xiao-yan², GAO Liang³

(1. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise of Ministry of Education,

East China Jiaotong University; Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. School of Civil Engineering and

Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the shortwave track irregularity problem, a numerical simulation method based on scattered binary wavelet was proposed. The relationship between ISO 3095 standard spectrum and wavelet coefficients was obtained with ISO 3095 standard spectrum as objective function. The algorithm flow and steps of numerical simulation were designed. Numerical simulation result and field measurement result for a subway section in Shanghai were compared. Analysis result shows that suitable wavelet decomposition level is eight and the lowest level covers the wavelength range of 512-1 024 mm. Time domain waveform of numerical simulation for shortwave track irregularity accords with the statistical characteristics of actual shortwave track irregularity and shows instability, its amplitude value distributes in the range of -0.15-0.15 mm. The difference between numerical simulation result and ISO 3095 standard spectrum results from the difference between octave sampling interval and 1/3 octave sampling interval. Using the binary wavelet transform can effectively realize the numerical simulation for shortwave track irregularity. Simulation result and test result are slightly different in amplitude and detailed waveform. It is suggested to do a large number of measurements and statistical analysis for

收稿日期:2015-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51478184,51478258)

作者简介:李再伟(1983-),男,吉林大安人,上海工程技术大学副教授,工学博士,从事轨道动力学研究。

shortwave track irregularity. 1 tab, 11 figs, 21 refs.

Key words: subway track; wavelet transform; 1/3 octave analysis; shortwave track irregularity; numerical simulation

Author resume: LI Zai-wei(1983-), male, associate professor, PhD, +86-21-67791163, lzw_5220964@163.com.

0 引 言

轨道短波不平顺是指波长为 1 m 以下的钢轨顶面垂向不平顺,主要包括轨面不均匀磨损、剥离掉块、擦伤、焊缝不平与接头错牙等^[1-3]。列车通过时短波不平顺会导致轮轨力剧增,加快轨道与车辆部件的伤损,使轨道几何状态更加恶化,还可能引发钢轨、轮轴断裂,导致恶性脱轨事故,且短波不平顺引起的啸叫声也是轨道交通噪声的主要来源之一,因此,有效评价和控制短波不平顺对保障乘坐平稳舒适和行车安全具有重要意义。

目前,对轨道短波不平顺的研究主要集中于相关检测设备研发、定量评价理论与轮轨动力作用特性方面。对于前两者而言,国内外已形成相对成熟的产品与理论方法,如德国 RMF 型波磨测量小车、SED-RC 型电子平直仪等短波不平顺检测设备^[4],并由欧洲铁路研究所制定了 ISO 3095 标准对短波不平顺进行定量评价;而在轮轨动力作用特性研究方面,则多采用车辆-轨道动力学模型,将轨道短波不平顺作为系统激励源进行仿真计算,由于所采用的车轨模型相对稳定和成熟^[5-9],因此,短波不平顺的输入成为解决问题的关键。在现有研究中,往往采用余弦波叠加短谐波法^[10]、正弦法^[11]、随机波长与随机波深模拟法^[12]、基于轨面粗糙度水平谱和谐波叠加法^[13]以及基于 Sato 谱与逆傅里叶模拟法^[14]。前四种方法是将短波不平顺视为均值为零的平稳高斯随机过程,利用正弦或者余弦波的叠加进行模拟,具有明显的周期性,这与现场实测波形有一定的差别;最后一种方法则基于逆傅里叶变换进行模拟,所产生不平顺波形具有平稳性,而实测轨道短波不平顺数据往往呈现一定的非平稳性^[15],使得模拟结果不能完全反映波形的固有特性。

鉴于轨道短波不平顺非平稳性和随机性特点,可采用小波分析理论进行数值模拟,该理论具有多分辨率分析和适应性分析的特点,可以有效突出短波不平顺的局部特征^[16],在不平顺局部波形预测、辨识与轨道病害识别等方面,得到一定的应用^[17-19]。

基于此,本文提出一种采用二进制小波对轨道短波不平顺进行数值模拟的方法,以 ISO 3095 标准谱为目标函数,给出了相应算法的实现步骤,并利用上海地铁实测数据对数值模拟结果的准确性和有效性进行验证,为完善轮轨动力学计算和轨道结构设计提供技术支持。

1 基本原理

1.1 离散小波变换

对时间序列进行离散化^[20],设采样时段总数为 N ,第 n 个时段时间序列 $x(n)$ 的离散小波变换为

$$W_{j,k} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \alpha_{j,k} \quad (1)$$

式中: $W_{j,k}$ 为离散小波变换; j 为尺度步长; k 为时移步长; $\alpha_{j,k}$ 为小波基函数的复共轭函数。

小波基函数为小波母函数 $\beta(n)$ 经过伸缩、平移得到的序列 $\phi_{j,k}$ 为

$$\phi_{j,k} = a^{-j/2} \beta(a^{-j}n - kb) \quad (2)$$

式中: a, b 为标度因子; $\beta(\cdot)$ 为小波母函数。

令 $a=2, b=1$,则式(2)可变为二进正交小波基函数,利用此函数对 $x(n)$ 进行离散化小波分解,可得相应小波系数 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = (U, d_i, d_{i-1}, \dots, d_1) \quad (3)$$

式中: U 为低频小波系数; i 为小波分解层数; d_i 为第 i 层高频小波系数。

第 i 层小波系数有效值 μ_i 为

$$\mu_i = \sqrt{\sum_{q=1}^Q d_{i,q}^2} / Q \quad (4)$$

式中: Q 为第 i 层小波系数的数量; $d_{i,q}$ 为第 i 层的第 q 个小波系数。

将分解后得到的离散小波系数进行波形重构,可得

$$x(n) = 2^{-j/2} \sum_j \sum_k W_{j,k} \gamma(2^{-j}n - k) \quad (5)$$

式中: $\gamma(2^{-j}n - k)$ 为小波母函数经过伸缩、平移后的复共轭函数。

1.2 小波基与分解层数选取

由于 db 小波系列具有紧支撑性、正交性与有较

好正则性,被广泛用于轨道不平顺处理分析中。为了便于程序实现和提高小波规则性,本文选取 db 小波系列的 db8 小波作为小波基函数进行数据分析。

对短波不平顺时域序列进行数值模拟时,由于实测数据样本采样间隔为 2 mm,且短波不平顺最大波长为 1 000 mm,当小波分解层数为 8 时,分解的最低层所包含的波长范围为 512~1 024 mm,满足短波波长范围要求,因此,分解层数选为 8 层。

2 短波不平顺数值模拟

要实现对轨道短波不平顺的有效模拟,必须确定准确的目标函数,本文采用 ISO 3095 标准谱作为短波不平顺数值模拟的目标函数(图 1)。

此标准将短波不平顺通过三分之一倍频分析进行不同频带的划分,计算相应频带内不平顺有效值,可得上限波长 λ_1 、下限波长 λ_2 与中心波长 λ_3 之间的关系为

$$\begin{cases} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 2^{1/3} \\ \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_3} = 2^{1/6} \end{cases} \quad (6)$$

表 1 频带对应关系

Tab. 1 Frequency band correspondence relationship

分解层数	小波中心下限波长	小波中心上限波长	三分之一倍频中心波长	三分之一倍频下限波长	三分之一倍频上限波长
1	4	8	5.0, 6.3, 8.0	4.5	8.9
2	8	16	10.0, 12.5, 16.0	8.9	17.8
3	16	32	20.0, 25.0, 31.5	17.8	35.6
4	32	64	40.0, 50.0, 63.0	35.6	71.3
5	64	128	80.0, 100.0, 125.0	71.3	142.5
6	128	256	160.0, 200.0, 250.0	142.5	285.1
7	256	512	315.0, 400.0, 500.0	285.1	570.2
8	512	1 024	630.0, 800.0, 1 000.0	570.2	1 140.4

由于三分之一倍频程频谱与倍频程频谱具有整体一致性,因此,可采用对三分之一倍频程频谱进行线性插值来实现倍频程频谱的计算。小波分解得到的小波系数表征着轨道不平顺与小波基函数的相似程度,为量纲为 1 的系数;小波基函数由小波母函数经过伸缩和平移后得到,第 j 层小波母函数的伸缩比例为 $2^{-j/2}$,且小波母函数在频域内支撑值为 1。在相同频带内,经过倍频程带通滤波后不平顺幅值 Y_{f_i} 与小波系数 d_i 之间的关系式为

$$d_i = \sqrt{2^i} Y_{f_i} \quad (8)$$

在同一频带内倍频程带通滤波后不平顺幅值有效值 ϵ_i 与小波系数有效值 R_{f_i} 之间的关系式为

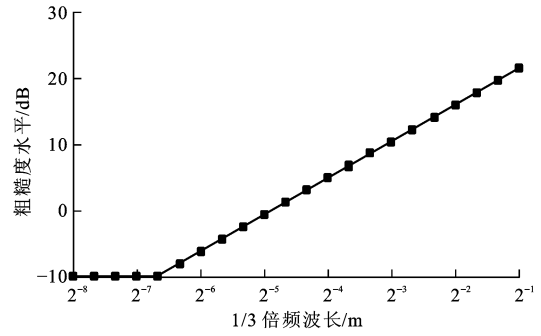


图 1 ISO 3095 标准谱

Fig. 1 Standard spectrum of ISO 3095

采用二进制小波基进行小波分解,由于每层频带相对宽度与倍频层频带相对宽度一致,所以小波分解后各层频带的上限波长 λ_4 、下限波长 λ_5 与中心波长 λ_6 之间的关系为

$$\begin{cases} \frac{\lambda_4}{\lambda_5} = 2 \\ \frac{\lambda_6}{\lambda_5} = \frac{\lambda_4}{\lambda_6} = 2^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知,小波分解与三分之一倍频分析所得频带相对宽度有差别,当小波分解层数为 8 时,两者之间频带对应关系见表 1。

$$\epsilon_i = \sqrt{2^i} R_{f_i} = \sqrt{2^i} \left(\frac{r_{f_{3i-2}} + r_{f_{3i-1}} + r_{f_{3i}}}{3} \right) \quad (9)$$

$$r_{f_i} = 10^{\frac{L_{f_i}}{20}} h \quad (10)$$

式中: $r_{f_{3i}}$ 为经过中心频率为 f_{3i} 的三分之一倍频程滤波后的不平顺幅值; L_{f_i} 为中心频率为 f_i 的短波不平顺水平; h 为不平顺参考值。

符合 ISO 3095 标准谱的小波系数有效值为

$$\epsilon_i = \sqrt{2^i} h \frac{10^{\frac{L_{f_{3i-2}}}{20}} + 10^{\frac{L_{f_{3i-1}}}{20}} + 10^{\frac{L_{f_{3i}}}{20}}}{3} \quad (11)$$

在此基础上再进行小波系数的伸缩变换和重构,即可实现以 ISO 3095 标准谱作为目标函数的短波不平顺有效数值模拟,算法流程见图 2,具体步骤如下。

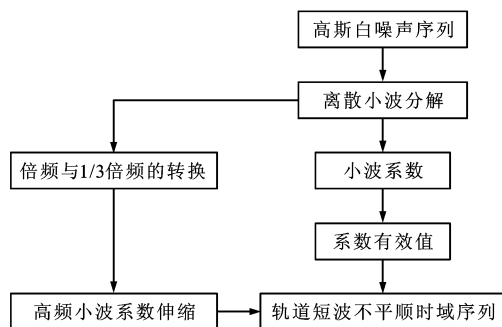


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

Step 1: 利用随机生成的白噪声序列进行离散小波分解, 得到各层小波系数并计算每层小波系数有效值 μ_i 。

Step 2: 对高频小波系数进行相应的比例伸缩, 得

$$e_i = \varepsilon_i d_i / \mu_i \quad (12)$$

式中: e_i 为伸缩后的小波系数。

Step 3: 将低频小波系数 U 的系数置 0 得到 V , 从而确定伸缩后时域序列的小波系数为

$$\mathbf{X}(j, k) = (V, e_i, e_{i-1}, \dots, e_1) \quad (13)$$

Step 4: 利用获得的小波系数进行小波重构, 可得符合 ISO 3095 标准谱的轨道短波不平顺时域序列 $y(n)$ 为

$$y(n) = 2^{-j/2} \sum_j \sum_k \mathbf{X}(j, k) \gamma(2^{-j}n - k) \quad (14)$$

3 实例验证

为了验证方法的有效性, 对上海地铁 1 号线某段轨道短波不平顺进行测量, 所用设备为 RMF 型波磨测量仪(图 3), 仪器采样间隔为 2 mm, 采样长度为 8.0 m。实测时域波形见图 4, 可以看出有明显的低频趋势项存在。选取 db8 小波作为母小



图3 RMF 型波磨测量仪

Fig. 3 RMF rail corrugation device

波, 进行 8 层小波分解。将最后一层小波系数置零, 再进行小波重构以去除检测数据中的低频趋势项, 时域波形见图 5。消除低频趋势项前、后数据的小波分解结果分别见图 6、7, 对比可知, 在相同频段内数据呈现相似的变化规律, 且幅值范围变化较小, 说明采用小波去除低频趋势项的方法可提高检测数据的准确性和有效性, 可用于实测数据的分析和处理。

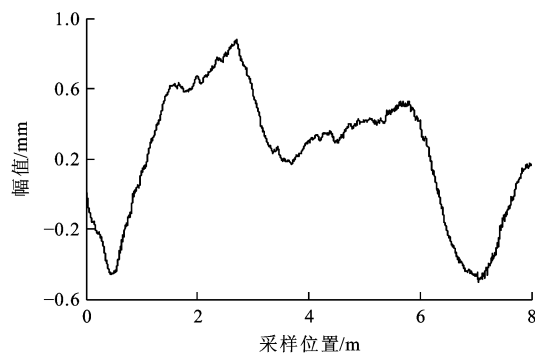


图4 实测时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of field measurement

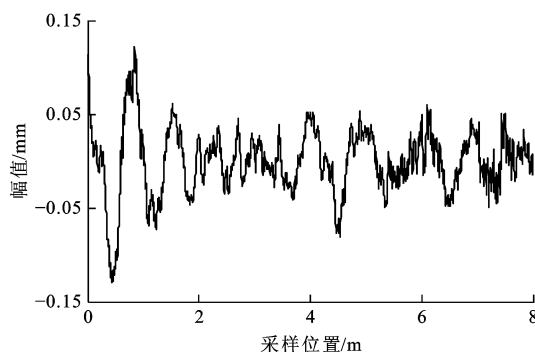


图5 消除低频趋势项后的时域波形

Fig. 5 Time domain waveform after eliminating low frequency trend item

实测三分之一倍频谱与 ISO 3095 标准谱的对比见图 8。可知, 地铁线路短波不平顺谱线在高频区段高于 ISO 3095 标准谱线, 说明该段地铁短波不平顺状态在部分频段表现不良, 主要是由于地铁线路曲线较多, 轮轨接触关系在较高运行速度条件下难以保持良好状态, 大量减振扣件和相关轨道结构的使用也在某种程度上加剧了轨道短波不平顺的状态。

对轨道短波不平顺进行数值模拟, 其采样频率和样本长度与前面实测数据一致, 模拟的短波不平顺时域波形和不平顺水平谱分别见图 9、10。

由图 9 可知, 短波不平顺数值模拟时域波形的幅值分布范围为 $-0.15 \sim 0.15$ mm, 这与实测数据时域波形区间范围相一致, 但实测波形上毛刺相对较多, 变化较为剧烈, 说明在高频段实测数据较数值

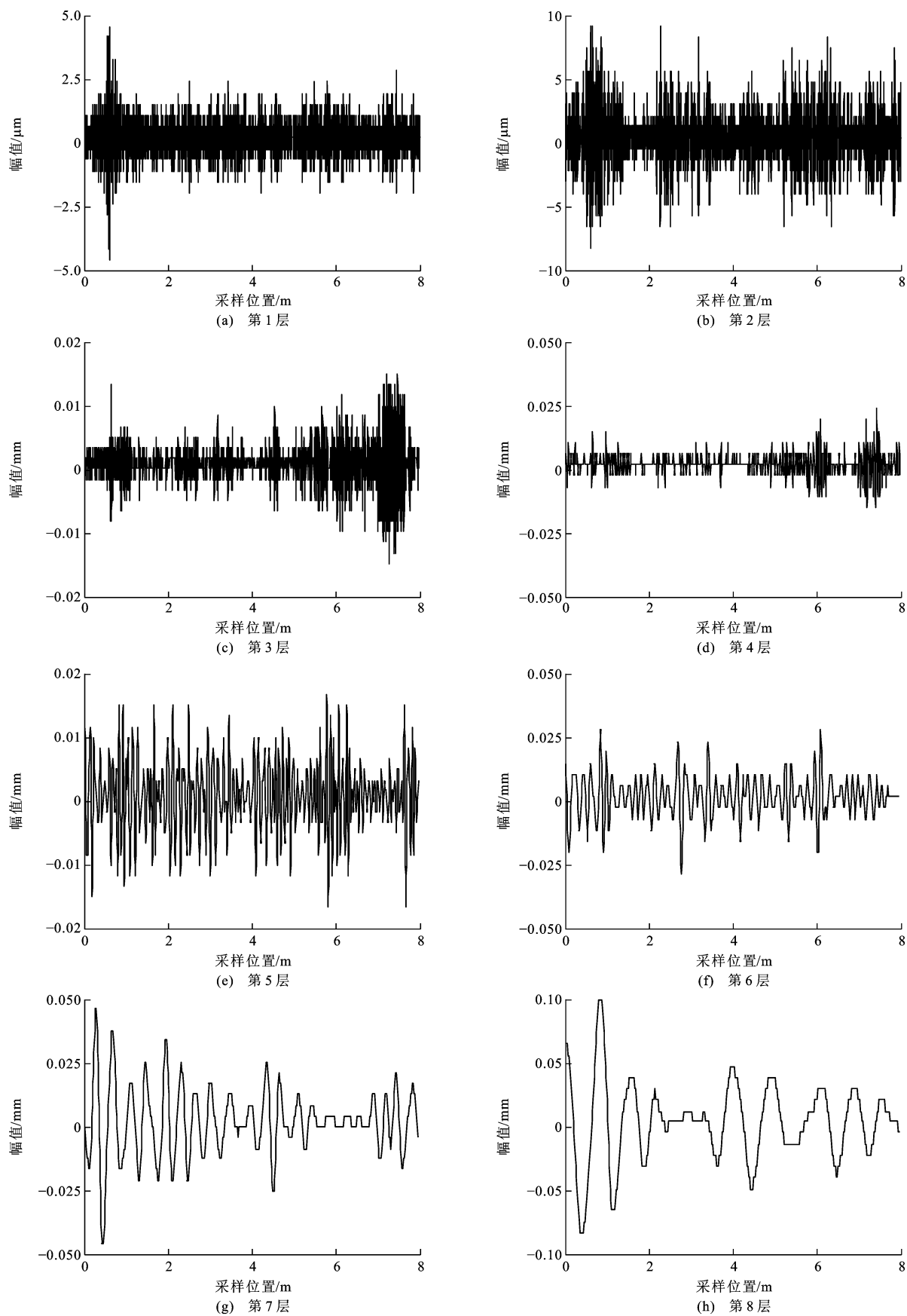


图 6 小波分解结果

Fig. 6 Wavelet decomposition result

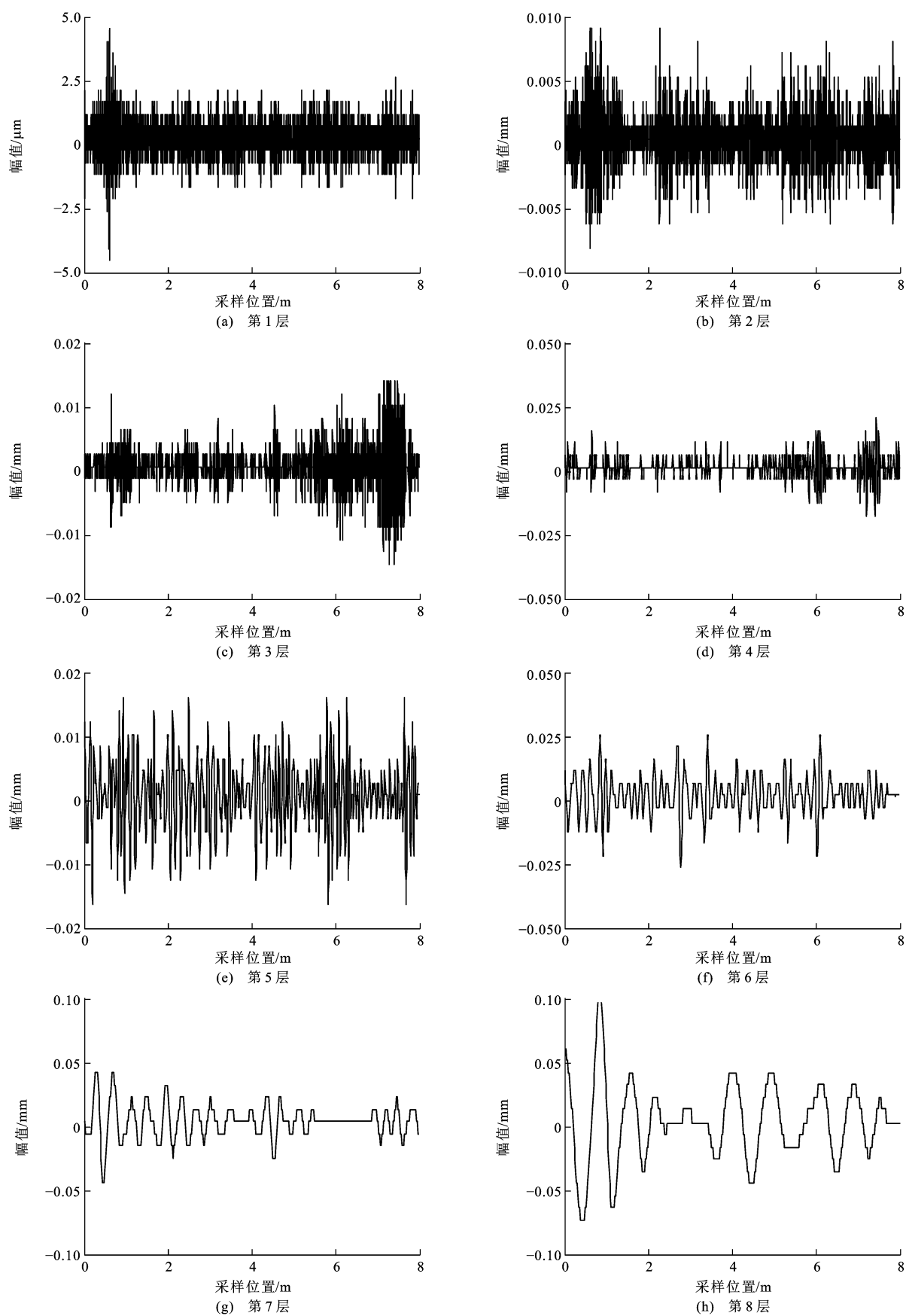


图 7 消除低频趋势项后的小波分解结果

Fig. 7 Wavelet decomposition result after eliminating low frequency trend item

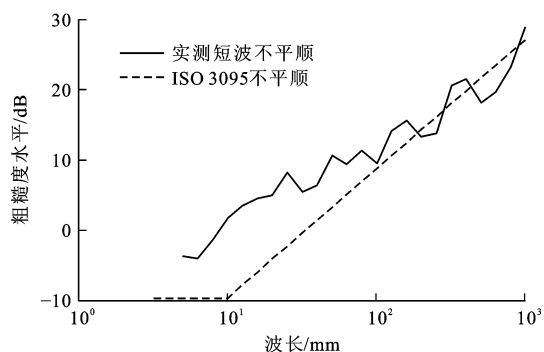


图 8 谱线对比

Fig. 8 Spectrum comparison

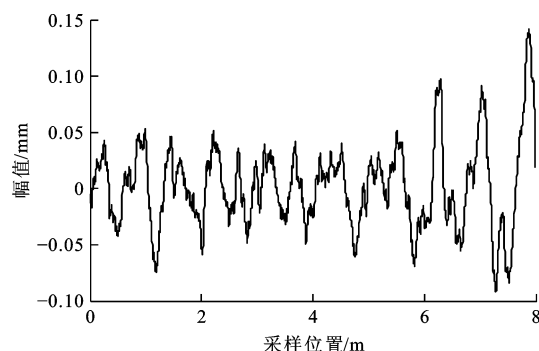


图 9 数值模拟时域波形

Fig. 9 Time domain waveform of numerical simulation

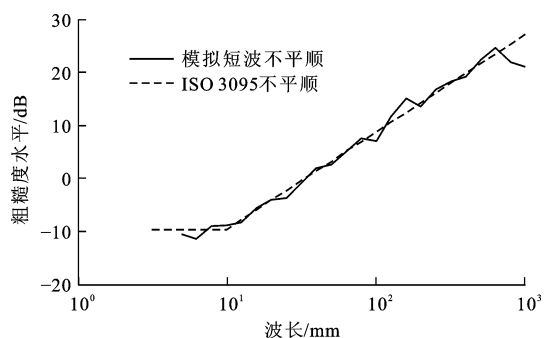


图 10 数值模拟不平顺水平谱

Fig. 10 Irregularity level spectrums of numerical simulation

模拟大。利用轮次检验法对数值模拟结果进行计算,可知平稳性在可靠度 90% 的置信区间时,短波不平顺数值模拟结果符合非平稳性特征,这与短波不平顺实际统计所呈现的规律相符^[21]。由图 10 可知,数值模拟的不平顺水平谱与 ISO 3095 标准谱符合度较好,基本体现了标准谱的特征,但数值模拟存在一定的波动性,这主要是因为模拟算法所用小波变换的采样间隔为倍频程,而进行标准谱计算时采样间隔为三分之一倍频程。

数值模拟小波分解结果见图 11。可知,数值模拟结果基本呈现了实测结果的频段变化特征,只是在幅值和细部波形方面略有差别,这主要是由于数

值模拟是随机结果,且模拟的目标函数与实测谱之间也有一定差异。建议对轨道短波不平顺进行大量的测量与统计分析,为形成短波不平顺评价方法提供技术支持。

4 结 语

本文提出了一种基于离散二进制小波进行轨道短波不平顺数值模拟的方法,将 ISO 3095 标准谱作为目标函数,给出了数值模拟算法流程与实现步骤,并将数值模拟结果与上海地铁实测结果进行对比分析。

(1)短波不平顺数值模拟结果在时域上符合实际不平顺的统计特征,幅值分布范围为 $-0.15 \sim 0.15$ mm,频域上与 ISO 3095 标准谱整体符合较好,两者存在的差异由倍频程与三分之一倍频程采样间隔的差异造成。

(2)采用二进制小波变换可以有效实现轨道短波不平顺数值模拟,模拟结果与实测结果在幅值和细部波形方面略有差别,建议对轨道短波不平顺进行大量的测量与统计分析,为形成短波不平顺评价方法提供技术支持。

参考文献:

References:

- [1] GRASSIE S L. Rail irregularities, corrugation and acoustic roughness: characteristics, significance and effects of reprofiling[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(5): 542-557.
- [2] MOLODOVA M, LI Z L, DOLLEVOET R. Axle box acceleration: measurement and simulation for detection of short track defects[J]. Wear, 2011, 271(1/2): 349-356.
- [3] 周宇.城市轨道交通轨道短波不平顺水平谱分析[J].城市轨道交通研究,2014,17(4):18-22.
ZHOU Yu. Analysis of rail surface roughness level spectrum for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(4): 18-22. (in Chinese)
- [4] GRASSIE S L. Measurement of longitudinal rail irregularities and criteria for acceptable grinding[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 227(5): 949-964.
- [5] LEI Xiao-yan, ZHANG Bin. Analysis of dynamic behavior for slab track of high-speed railway based on vehicle and track elements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(4): 227-240.
- [6] LEI Xiao-yan, WANG Jian. Dynamic analysis of the train and slab track coupling system with finite elements in a moving frame of reference[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(9): 1301-1317.
- [7] WANG Kai-yun, LIU Peng-fei, ZHAI Wan-ming, et al. Wheel/rail dynamic interaction due to excitation of rail corrugation in

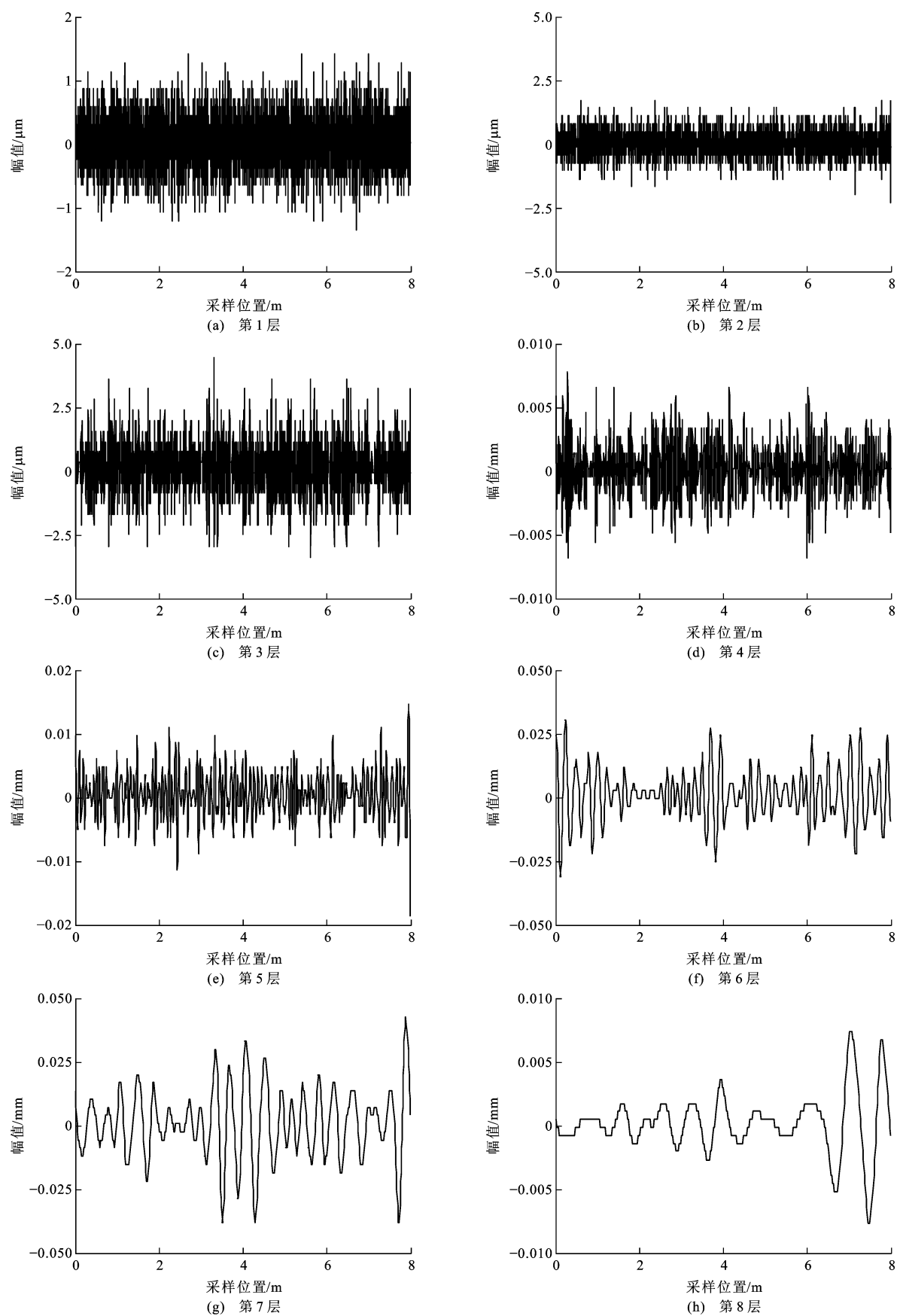


图 11 数值模拟小波分解结果

Fig. 11 Wavelet decomposition result of numerical simulation

- high-speed railway[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2): 226-235.
- [8] WANG P, REN J J; XIANG R, et al. Influence of rub-plate length on forces and displacements of longitudinally coupled slab track for a bridge turnout[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(3): 284-293.
- [9] 高亮,王璞,蔡小培,等.基于多车精细建模的曲线地段重载列车-轨道系统动力性能研究[J].振动与冲击,2014,33(22): 1-6,12.
- GAO Liang, WANG Pu, CAI Xiao-pei, et al. Dynamic characteristics of train-track system in curved track sections based on elaborate multi-vehicle model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 1-6, 12. (in Chinese)
- [10] 翟婉明,韩卫军,蔡成标,等.高速铁路板式轨道动力特性研究[J].铁道学报,1999,21(6):65-69.
- ZHAI Wan-ming, HAN Wei-jun, CAI Cheng-biao, et al. Dynamic properties of high-speed railway slab tracks[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(6): 65-69. (in Chinese)
- [11] 周永健,练松良,杨文忠.轨面短波不平顺对轮轨力影响的研究[J].华东交通大学学报,2009,26(4):6-12.
- ZHOU Yong-jian, LIAN Song-liang, YANG Wen-zhong. Research of the impact of short wave track irregularity on the wheel-rail force[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26(4): 6-12. (in Chinese)
- [12] 李斌,刘学毅.客运专线铁道车辆随机振动特性[J].西南交通大学学报,2010,45(2):191-195,212.
- LI Bin, LIU Xue-yi. Random vibration property of high-speed railway vehicle in passenger dedicated line[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2): 191-195, 212. (in Chinese)
- [13] 毛晓君,周宇,许玉德.轨面短波不平顺时域反演算法研究[J].华东交通大学学报,2014,31(1):7-12.
- MAO Xiao-jun, ZHOU Yu, XU Yu-de. Time domain inversion algorithm for rail surface irregularities[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(1): 7-12. (in Chinese)
- [14] 徐庆元.短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-桥梁系统动力特性影响[J].土木工程学报,2011,44(10):132-137.
- XU Qing-yuan. Influence of short-wave random irregularity on the dynamic characteristics of train-slab track-bridge system[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 132-137. (in Chinese)
- [15] 韦红亮,练松良,刘扬.城市轨道交通轨面短波不平顺测试分析[J].华东交通大学学报,2011,28(4):33-37.
- WEI Hong-liang, LIAN Song-liang, LIU Yang. Experimental study on rail surface shortwave irregularity in urban mass transit[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(4): 33-37. (in Chinese)
- [16] 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 Xian-mai, WANG Lan, TAO Xia-xin, et al. Analysis of track irregularity with wavelets analysis theory[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(1): 57-61, 71. (in Chinese)
- [17] 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 Xian-mai, XU Wei-chang, 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. (in Chinese)
- [18] 吕宏,李再伟,何越磊.考虑波长因素的轨道不平顺预测研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(6):1312-1318.
- LU Hong, LI Zai-wei, HE Yue-lei. The prediction method considering the factors of track irregularity wavelength[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1312-1318. (in Chinese)
- [19] 韩晋,杨岳,陈峰,等.基于小波变换的轨道检测数据滤波方法[J].铁道科学与工程学报,2013,10(5):116-122.
- HAN Jin, YANG Yue, CHEN Feng, et al. Data filtering approach of rail detection based on wavelet transform[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(5): 116-122. (in Chinese)
- [20] DAUBECHIES I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1988, 41(7): 909-996.
- [21] 刘秀波,吴卫新.钢轨焊接接头短波不平顺功率谱分析[J].中国铁道科学,2000,21(2):26-34.
- LIU Xiu-bo, WU Wei-xin. PSD analysis of shortwave irregularity on welded joints[J]. China Railway Science, 2000, 21(2): 26-34. (in Chinese)