

# 城市轨道交通轨道短波不平顺特性实测研究<sup>\*</sup>

韦红亮<sup>1</sup> 郑稳稳<sup>2</sup> 王宏轩<sup>2</sup> 房建<sup>2</sup> 雷晓燕<sup>2</sup> 练松良<sup>3</sup>

(1. 广西壮族自治区高速公路发展中心, 530022, 南宁;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能检测与保障国家重点实验室, 33013, 南昌;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的:轨道短波不平顺会引起轮轨系统高频振动,形成巨大的轮轨冲击力,危害行车安全。对此需要研究城市轨道交通轨道短波不平顺特性。方法:基于上海市轨道交通11号线轨面短波不平顺现场实测数据,对实测数据进行消除异常值和趋势项等预处理后,采用ISO 3095:2013《声学-轨道交通-轨道车辆发出的噪声测量》对上海轨道交通11号线真如站—枫桥路区间轨面不平顺状态进行评判;并利用最大熵谱法对不同轨道类型的轨道短波不平顺功率谱进行估计,将得到的功率谱密度曲线与中国铁道科学研究院提出的石太线(石家庄—太原)短波不平顺功率谱、学者Sato提出的粗糙度功率谱进行比较。结果及结论:轨道短波不平顺幅值分布接近正态分布,轨面不平顺最大幅值可达1.5 mm。随着轨道短波不平顺幅值频率分布曲线形状呈现中间高两边低,分布特性近似于正态分布。在分析波长范围内,轨道短波不平顺水平谱值均超出ISO 3095:2013标准限值,最大差值达20.87 dB。DTⅢ-2扣件型支承块轨道结构轨面不平顺状态要优于减振器扣件型支承块轨道结构及浮置板轨道结构。上海轨道交通11号线的轨面状态优于石太线普速铁路。

**关键词** 城市轨道交通;短波不平顺;不平顺幅值分布;功率谱密度

**中图分类号** U211.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.015

## Field Measurement Study on Urban Rail Transit Track Short-wave Irregularities

WEI Hongliang, ZHENG Wenwen, WANG Hongxuan, FANG Jian, LEI Xiaoyan, LIAN Songliang

**Abstract** Objective: Track short-wave irregularities can lead to high-frequency vibrations in wheel-rail system, resulting in a significant wheel-rail impact force and undermining operational safety. It is aimed to investigate the characteristics of urban rail transit track surface short-wave irregularities. Method: Based on the field-measured data of Shanghai Rail

Transit Line 11 track surface short-wave irregularities, the field-measured data is preprocessed by eliminating outliers and trends. ISO 3095:2013 Acoustics-Railway applications-Measurement of noise emitted by railbound vehicles is used to evaluate the track surface irregularities along Line 11 Zhenru Sta. - Fengqiao Road Sta. interval. The maximum entropy spectrum method is employed to estimate the track short-wave irregularity power spectra for different track types. The obtained power spectral density curves are compared with the short-wave irregularity power spectra proposed by China Academy of Railway Sciences for Shi-Tai Line (Shijiazhuang-Taiyuan) and the roughness power spectrum suggested by scholar Sato. **Result & Conclusion:** The amplitude distribution of track short-wave irregularities approximates a normal distribution, with the maximum track irregularity amplitude reaching 1.5 mm. The frequency distribution curve of track short-wave irregularities exhibits high in the middle and low on both sides, the characteristics of which resembles the normal distribution. Within the analyzed wavelength range, the horizontal spectral values of track short-wave irregularities exceed the limits specified in ISO 3095:2013, with a maximum difference of 20.87 dB. The DTⅢ-2 fastener-type bearing block track structure exhibits better track surface irregularity conditions compared to the vibration-damping fastener-type bearing block track structure and the floating slab track structure. The track surface condition of Shanghai Rail Transit Line 11 is better than that of Shi-Tai common speed railway line.

**Key words** urban rail transit; short-wave irregularity; irregularity amplitude distribution; power spectrum density

**First-author's address** Guangxi Zhuang Autonomous Region Expressway Development Center, 530022, Nanning, China

轨道短波不平顺会引起轮轨系统高频振动。轨道结构的振动经桥梁或隧道等结构向周围土体

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51668019);江西省教育厅科研项目(GJJ180297)

传播,引起周围的环境(包含建筑物)振动,并产生辐射噪声。对于采用高架形式的城市轨道交通而言,轮轨系统高频振动形成的轮轨噪声,并通过空气向周围传播。国内外研究表明,轨道短波不平顺虽幅值不大(通常小于 2 mm),但会使轮轨之间产生剧烈冲击,形成巨大的轮轨冲击力,进一步增大振动和噪声,导致扣件松动,危害行车安全<sup>[1]</sup>。

目前,国内外学者主要从理论和试验角度研究了轨道短波不平顺特性及其同轨道交通振动及噪声之间的关系。文献[2-4]等通过建立理论模型,分析了轨道短波不平顺对轨道结构振动、噪声及高频轮轨接触力的影响。文献[5-7]利用现场实测的方法,分别针对轨道短波不平顺幅值及短波不平顺水平谱等展开了研究。

受轨道短波不平顺检测手段及分析手段的制约,我国还未对城市轨道交通轨道短波不平顺展开充分研究。本文对上海轨道交通 11 号线轨道短波不平顺进行现场实测,在对原始数据消除异常值和趋势项进行预处理的基础上,进一步分析轨道短波不平顺的幅值分布特性,并进行平顺度的评价;此外,还基于最大熵谱法对轨道短波不平顺的功率谱进行了评估分析。

## 1 测试概况

为对上海轨道交通轨面平顺度进行评价,本研究采用英国 Rail Measurement 公司生产的 CAT(单轨波磨测量小车)钢轨波磨测量仪对上海轨道交通 11 号线轨道短波不平顺情况进行了测试分析。测试时间为 2018 年 5—12 月,测试总里程约为 50 km。采样点为 500 个/m,采样测量速度为 3~4 km/h。测试线路为 25 m 钢轨焊接形式的无缝线路。轨道短波不平顺样本数据如图 1 所示。

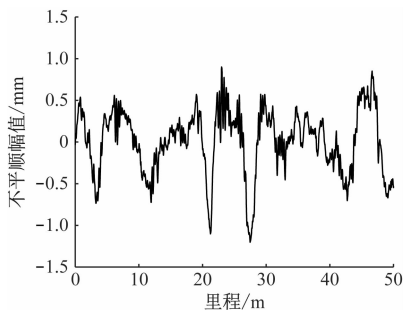


图1 轨道短波不平顺样本数据

Fig. 1 Sample data of track short-wave irregularity

## 2 轨道短波不平顺数据预处理

### 2.1 异常值处理

CAT 钢轨波磨测量仪在检测过程中,受人为因素,以及传感器及数据传输质量等影响,检测数据会出现异常值。统计结果表明,单位长度内的轨道不平顺实际变化率一般不会大于 3‰。因而,变化率超过 3‰的数据可作为异常值处理。

本文采用相邻值比较法剔除异常值。剔除异常值前后的不平顺数据如图 2 所示。由图 2 可见,相邻值比较法能有效剔除异常值。

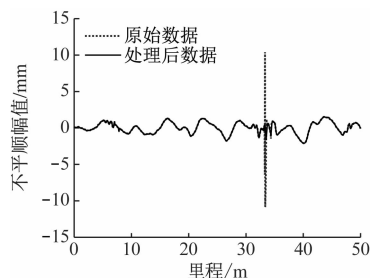


图2 剔除异常值前后的不平顺数据

Fig. 2 Irregularity data before and after removing abnormal values

### 2.2 消除趋势项

在轨道短波不平顺测量中,由于钢轨顶面并非绝对水平,且测量仪器选择的基准线在测量区轨面不平顺最大值处,故测量结果包含钢轨本身和测量基线所引起的线性趋势项。由此可知,数据分析要先消除测量数据中的线性趋势项。

本文采用最小二乘法消除测量数据中的线性趋势项。消除趋势项前后对比的不平顺数据如图 3 所示。由图 3 可见,样本中的趋势项消除后,轨道短波不平顺总体上满足显著性水平为 0.05 的平稳性检验要求,此时的轨道短波不平顺可近似认为平稳。

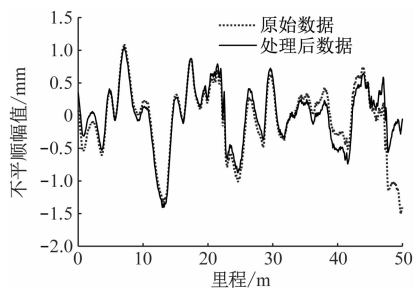


图3 消除趋势项前后的不平顺数据

Fig. 3 Irregularity data before and after eliminating trend items

### 3 轨道短波不平顺幅值及水平谱分析

#### 3.1 幅值统计分析

轨道短波不平顺幅值分布规律将会对轮轨动荷载的分布特性产生影响,讨论轨道短波不平顺的幅值分布情况是必要的。本文以上海轨道交通 11 号线(以下简称“11 号线”)真如站—枫桥路站区间(以下简称“真—枫区间”)上下行轨道短波不平顺数据为例,对轨道短波不平顺幅值范围在一定统计区间内的分布情况进行统计分析,以了解轨道短波不平顺幅值的分布特性。统计区间为 0.10 mm,真—枫区间的轨道短波不平顺幅值分布的统计结果如图 4 所示。

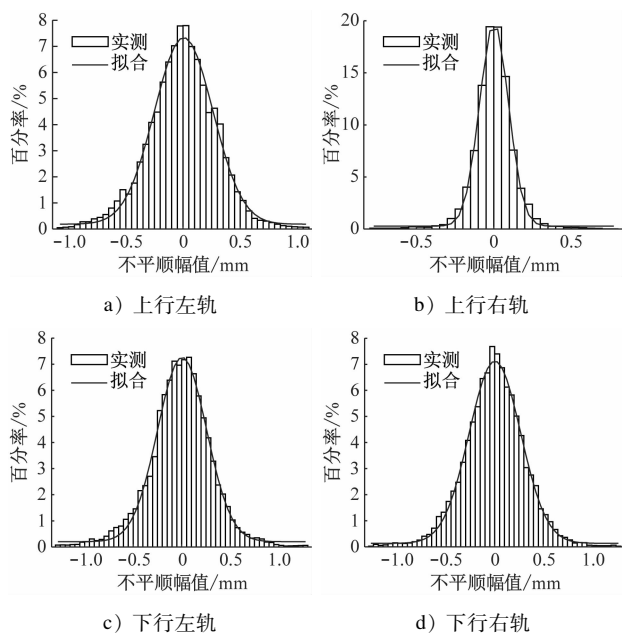


图 4 上下行轨道短波不平顺幅值分布统计图

Fig. 4 Statistics diagram of short-wave irregularity amplitude distribution of upward and downward tracks in Zhen-Feng Interval

对比图 4,比较各区段钢轨短波不平顺幅值分布情况可知,上行右轨的不平顺幅值偏小,轨面损伤程度轻,轨面状态较优。

#### 3.2 轨道短波不平顺水平谱分析

ISO 3095:2013《声学-轨道交通-轨道车辆发出的噪声测量》为评价轨面不平顺状态的一项重要标准,在国际得到了广泛的应用。本文通过轨道短波不平顺水平谱值  $L_r$  对轨道交通轨面不平顺状态进行评价,有:

$$L_r = 20 \lg(r/r_0) \quad (1)$$

式中:

$r$ ——轨道短波不平顺幅值的均方根值;

$r_0$ ——参考不平顺幅值, $r_0$  取  $1 \mu\text{m}$ 。

根据真—枫区间轨道短波不平顺实测数据计算  $L_r$ ,并将  $L_r$  平均值与 ISO 3095:2013 的限值进行对比。真—枫区间轨面平顺度的对比如图 5 所示。

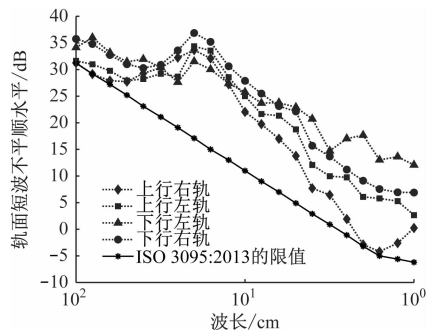


图 5 真—枫区间轨面平顺度的对比

Fig. 5 Comparison of rail surface smoothness in Zhen-Feng Interval

再分析波长范围:上下行的左右轨  $L_r$  均超过 ISO 3095:2013 限值,最大差值达 20.87 dB,出现于下行左轨 2 cm 波长处;上行线路  $L_r$  在 1.0 ~ 10.0 cm 和 31.5 ~ 100.0 cm 波长范围内均低于下行线路  $L_r$ ,表明上行线路整体的轨面状态优于下行线路;在 1.0 ~ 12.5 cm 和 50.0 ~ 100.0 cm 波长范围内,上行右轨  $L_r$  低于其他钢轨  $L_r$ ,表明上行右轨的整体轨面不平顺状态较其他钢轨更优。

### 4 轨道短波不平顺功率谱估计及分析

本文采用最大熵谱法对轨道短波不平顺功率谱进行估计,以分析短波不平顺幅值能量随波长变化的规律。

#### 4.1 最大熵谱法

最大熵谱法是在保证最大熵的前提条件下,利用已知的自相关函数值向两边外推,进而得到未知的自相关函数值,由于数据外推时不施加任何的限制,故外推所得自相关函数值的随机性最强,其结果也更合理。

采用最大熵谱法估计得到的功率谱为:

$$\tilde{G}_x(f) = \frac{p_m \Delta t}{\left| 1 + \sum_{m=1}^M a_m e^{-j2\pi f m \Delta t} \right|^2} \quad (2)$$

式中:

$\tilde{G}_x(f)$ ——最大熵功率谱;

$\Delta t$ ——时间间隔;

$j$ ——虚部;  
 $f$ ——频率;  
 $M$ ——滤波因子长度;  
 $m$ ——最大熵谱法估值参数,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  
 $a_m$ ——第  $m$  个预测误差滤波系数;  
 $p_m$ ——白噪声序列中第  $m$  个相关数。

经验证,最大熵谱估计值在计算过程中等价于 AR(自回归)模型,即可以利用 AR 模型来逼近最大熵谱,从而求得较为精确的解。基于这一等价思想,实现了最大熵功率谱和 AR 模型谱之间的转化,提出了新的 AR 模型谱计算方法:

$$S_{AR}(f) = \frac{2\sigma^2}{\left|1 + \sum_{k=1}^K a_k e^{fk\Delta t}\right|^2} \quad (3)$$

式中:

$S_{AR}(f)$ ——新的 AR 模型谱估计的功率谱;  
 $K$ ——AR 模型的阶次;  
 $k$ ——AR 模型的阶次参数,  $k = 1, 2, \dots, K$ ;  
 $\sigma^2$ ——白噪声序列的方差;  
 $a_k$ ——AR 模型第  $k$  阶系数。

在新的 AR 模型中,确定 AR 模型的阶次十分困难。当阶次取值过小时,则功率谱密度曲线会趋于平滑,导致部分数据无法识别;当阶次取值过大时,功率谱密度曲线会发生震荡,产生虚假波峰,也会导致计算量激增。

根据经验公式,本研究的 AR 模型阶次取不平顺数据信号长度的 0.01 倍。

#### 4.2 轨道短波不平顺谱分析

为分析不同轨道类型的轨道短波不平顺功率谱特性,本文在 11 号线不同区段选择曲线段浮置板轨道、直线段 DT III-2 型扣件支承块式轨道及减振器扣件支承块式轨道,对短波不平顺数据进行分析。将 3 种类型轨道的短波不平顺功率谱同中国铁道科学研究院提出的石太(石家庄—太原)线短波不平顺功率谱(以下简称“铁科院短波谱”)<sup>[8]</sup>及日本学者 Sato 提出的粗糙度功率谱(以下简称“Sato 粗糙度谱”)进行对比,得到不同类型上、下行方向轨道的 PSD(短波不平顺功率谱密度)曲线如图 6—图 7 所示。

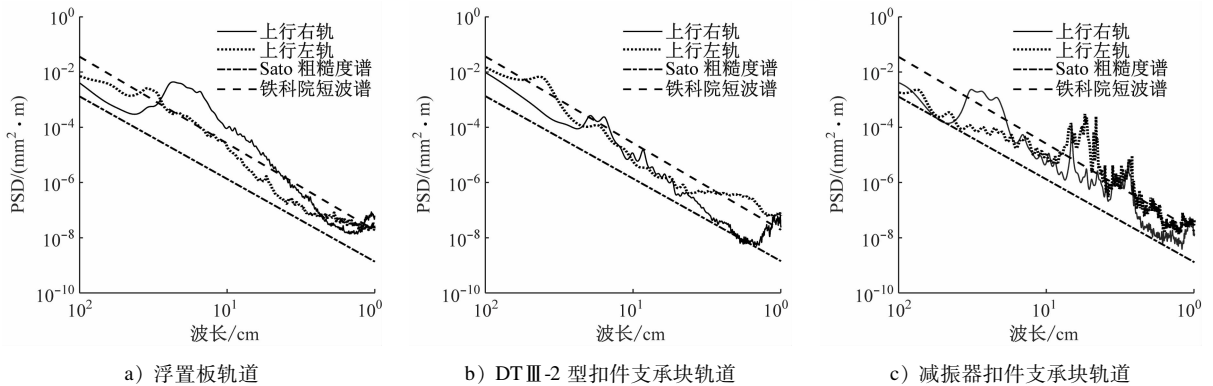


图 6 上行方向不同类型轨道的 PSD 曲线

Fig. 6 PSD curve of different track types in upward direction

图 6 a) 表明,对于浮置板轨道:上行右轨 PSD,在 4.0 ~ 30.0 cm 波长范围内高于铁科院短波谱,在其余分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 和铁科院短波谱 PSD 之间;上行左轨 PSD,在 10.0 ~ 41.0 cm 波长范围内与铁科院短波谱 PSD 相当,在其余分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 与铁科院短波谱 PSD 之间。

图 6 b) 表明,对于直线段非接头区的 DT III-2 扣件型支承块轨道:上行右轨 PSD,在 31.0 ~ 58.0 cm 和 1.0 ~ 2.5 cm 波长范围内高于铁科院短波谱 PSD;在其余分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 和铁科院短波谱 PSD 之间;上行左轨 PSD,

在整个分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 与铁科院短波谱 PSD 之间。

图 6 c) 表明,对于直线段非接头区的减振器扣件支承块轨道:上行右轨 PSD,在 18.5 ~ 35.3 cm 波长范围内和 6.9 cm 分析波长处,高于铁科院短波谱 PSD,在其余分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 和铁科院短波谱 PSD 之间;上行左轨 PSD 在 2.5 ~ 7.7 cm 波长范围内高于铁科院短波谱 PSD,在 1.0 ~ 7.7 cm 波长范围内与铁科院短波谱相当,在其余分析波长范围内介于 Sato 粗糙度谱和铁科院短波谱之间。

图 7 a) 表明,对于浮置板轨道:下行右轨 PSD



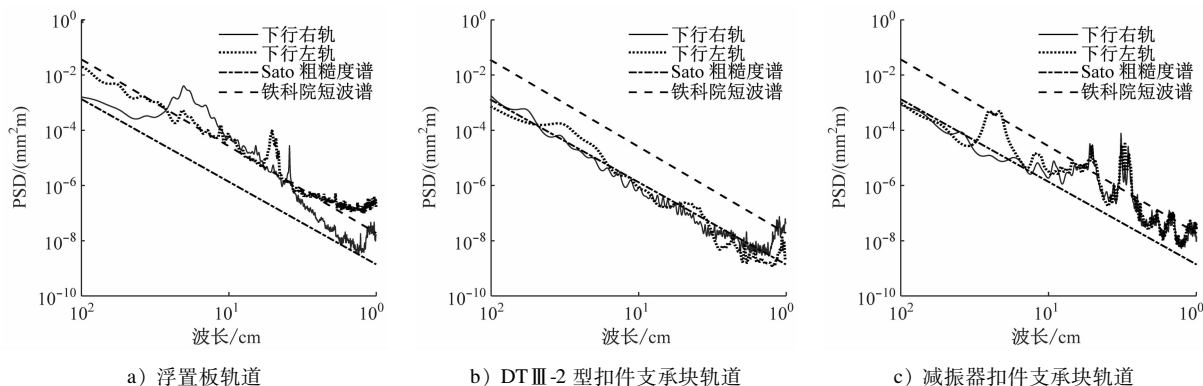


图7 下行方向不同类型轨道的 PSD 曲线

Fig. 7 PSD curve of different track types in downward direction

在 4.4 ~ 5.8 cm 波长范围内明显高于铁科院短波谱 PSD, 在其余分析波长范围内与铁科院短波谱基本相当; 上行左轨 PSD, 在 6.1 ~ 26.0 cm 波长范围内高于铁科院短波谱, 在其余分析波长范围内基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 与铁科院短波谱 PSD 之间。

图 7 b) 表明, 对于直线段非接头区 DT III-2 扣件型支承块轨道, 在整个分析波长范围内, 下行右轨和下行左轨的 PSD 均接近 Sato 粗糙度谱 PSD。

图 7 c) 表明, 对于直线段非接头区减振器扣件支承块轨道: 在 15.0 ~ 34.0 cm 波长范围内, 下行右轨 PSD 存在一个明显的波峰, 高于 Sato 粗糙度谱 PSD 与下行左轨 PSD, 接近铁科院短波谱 PSD; 在其他分析波长范围内, 下行右轨与下行左轨的 PSD 非常接近, 基本介于 Sato 粗糙度谱 PSD 和铁科院短波谱 PSD 之间。

将图 6 与图 7 进行比较发现: 在分析波长范围内, 直线区段 DT III-2 扣件型支承块轨道较其他几种轨道结构更加平稳, PSD 峰值较少, 其轨面状态更优; 采用减振器扣件的支承块轨道结构次之; 曲线段浮置板轨道 PSD 较高, 峰值较多, 表明曲线段轨面状态较差, 也可能是浮置板轨道结构的路段靠近站台, 列车进站和出站需要加速驱动和减速制动, 导致了钢轨表面损伤加深, 轨面状态也随之变差。

图 6 和图 7 表明, 11 号线的 PSD 大部分低于铁科院短波谱 PSD, 说明 11 号线的轨面状态要优于石太线普速铁路。经分析, 主要原因是近年来轨道结构技术的不断创新、轨道质量的不断提高及养护维修方式的不断改善。

## 5 结语

通过对 11 号线的轨道短波不平顺实测研究, 得

出以下结论:

1) 随着轨道短波不平顺幅值绝对值增大, 对应出现的幅值频率呈逐渐减小的趋势。频率分布曲线形状呈现中间高两边低, 分布特性近似于正态分布。

2) 上行线路左右轨及下行线路左右轨的  $L_r$  均超过 ISO 3095:2013 限值, 且最大差值是下行左轨位于 2 cm 波长处达到的 20.87 dB。上行右轨的  $L_r$  基本低于其他钢轨, 说明上行右轨轨面不平顺状态优于其他钢轨的轨面状态, 这与幅值分布统计结果一致, 表明分析轨道短波不平顺幅值分布和不平顺水平谱值都能较准确的得出钢轨轨面状态的优劣。

3) 在扣件与道床类型相同的情况下, 支承块式轨道结构轨道短波不平顺状态优于浮置板轨道; 在轨道和道床类型相同的情况下, DT III-2 型扣件型支承块轨道轨道短波不平顺状态优于减振器扣件型。

4) 11 号线的 PSD 整体低于铁科院短波谱 PSD, 说明 11 号线轨面状态优于石太线普速铁路轨面状态。

建议进一步对城市轨道交通短波不平顺进行研究, 从幅值域和频率域两方面展开分析, 提出适用于我国城市轨道交通的短波不平顺功率谱, 为轨道的养护维修提供参考。

## 参考文献

- [1] 牛留斌, 李谷, 刘金朝, 等. 轮轨力在轨道短波不平顺检测中的应用[J]. 铁道建筑, 2019, 59(8):133.  
NIU Liubin, LI Gu, LIU Jinzhao, et al. Application of the wheel-rail force in track short wave irregularity detection[J]. Railway Engineering, 2019, 59(8):133.
- [2] 房建, 韦智敏, 郑稳稳, 等. 城市高架轨道交通引发的箱梁振动特性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(4):136.

(下转第 99 页)

地层。

## 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2017 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2018(4): 6.  
China Association of Metros. Statistics and analysis report of urban rail transit in 2017[J]. China Metros, 2018(4): 6.
- [2] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures [M]. Michigan: Blackie, 1986.
- [3] 张治国, 张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3428.  
ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi. Deformation prediction of subway tunnel induced by EPB shield in soft clay during above and down overlapped traversing process and its construction control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3428.
- [4] 沈晓伟, 王涛. 盾构隧道施工对地下管线影响的有限元分析[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 649.  
SHEN Xiaowei, WANG Tao. Finite element analysis on influence of shield tunneling to underground pipelines[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 649.
- [5] 王明均, 崔文辉, 赵向忠, 等. 小净距隧道下穿既有地铁车站施工方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊1): 200.  
WANG Mingjun, CUI Wenhui, ZHAO Xiangzhong, et al. Study

on construction method of neighborhood tunnel underpass existing subway station based on FLAC3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 200.

- [6] 祝思然, 黄佩格, 矫伟刚, 等. 盾构近距离下穿既有地铁隧道沉降控制技术研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 234.  
ZHU Siran, HUANG Peige, JIAO Weigang, et al. Study on settlement control technologies for shield tunnel closely crossing underneath existing metro tunnel [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 234.
- [7] 尹锦涛. 砂卵石地层盾构隧道穿越敏感区域管棚加固技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.  
YIN Jintao. Research on pipe shed reinforcing technology of shield tunneling in sensitive area in sand pebbles stratum [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 韩冠楠. 砂卵石地层大断面平顶直墙隧道下穿运营地铁变形控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
HAN Guannan. Study on the deformation control of tunnels with flat top and vertical wall in large section of sand-pebble stratum under through operating subway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [9] 徐福田. 地铁隧道近距离下穿既有车站施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2013(增刊1): 52.  
XU Futian. Study on construction technology of subway tunnel under existing station at short distance [J]. Railway Construction Technology, 2013(S1): 52.

(收稿日期: 2022-08-23)

## (上接第 93 页)

- FANG Jian, WEI Zhimin, ZHENG Wenwen, et al. Study on vibration characteristics of elevated box girders induced by track irregularities[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(4): 136.
- [3] KHAJEHDEZFULY A. Effect of rail pad stiffness on the wheel/rail force intensity in a railway slab track with short-wave irregularity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(10): 1038.
- [4] CORREA N, VADILLO E G, SANTAMARIA J, et al. A versatile method in the space domain to study short-wave rail undulatory wear caused by rail surface defects[J]. Wear, 2016, 352: 196.
- [5] 周宇. 城市轨道交通轨面短波不平顺水平谱分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(4): 18.  
ZHOU Yu. Analysis of rail surface roughness level spectrum for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(4): 18.

- [6] 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.  
WEI Hongliang, LIAN Songliang, LIU Yang. Experimental study on rail surface shortwave irregularity in urban mass transit [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(4): 33.
- [7] 瞿锋. 城市轨道交通曲线钢轨短波不平顺分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(8): 65.  
QU Feng. Analysis of short wavelength irregularity of rail surface in curve of urban mass transit [J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(8): 65.
- [8] 王澜, 姚明初. 轨道结构随机振动理论及其在轨道结构减振研究中的应用[J]. 中国铁道科学, 1989, 10(2): 41.  
WANG Lan, YAO Mingchu. Random vibration theory of railtrack structure and its application in the study of railtrack vibration isolation [J]. China Railway Science, 1989, 10(2): 41.

(收稿日期: 2021-04-10)