

文章编号:1005-0523(2011)04-0033-05

城市轨道交通轨面短波不平顺测试分析

韦红亮¹, 练松良¹, 刘 扬²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201010)

摘要:通过对上海城市轨道交通和部分提速线路的轨面短波不平顺进行现场实测,在对测试数据进行平稳性检验的基础上进一步分析了轨面短波不平顺的幅值分布特性,采用BS EN ISO3095对轨面平顺度进行了分析和评价。研究表明,轨面短波不平顺幅值总体上满足显著性水平为0.05的平稳性检验要求,轨道交通1号线、2号线、3号线及沪宁线和沪昆线焊接接头区的轨面平顺度分别较ISO3095限值高出25.3, 21.7, 22.2, 17.8, 10.2 dB,轨道交通3号线、沪宁线及沪昆线的非接头区的轨面平顺度与ISO3095限值的差值分别为10.8, -4.2, -8.3 dB,城市轨道交通轨面不平顺状态劣于提速线路,相同线路条件下焊接接头区的轨面状态要差于非接头区。

关键词:轨面短波不平顺;城市轨道交通;平稳性检验;1/3倍频;实测分析

中图分类号:U216.42

文献标识码:A

近年来,城市轨道交通诱发的振动噪声问题越来越明显,其根源之一在于轨面短波不平顺。国内外研究^[1]表明,轨面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,引起巨大的轮轨冲击力,进一步增大振动和噪声,导致扣件松动,危害行车安全等。目前,国内外学者主要从理论分析和试验测试角度对轨面短波不平顺和轨道交通振动噪声之间的关系展开研究,Thompson^[2-5]、Berggren Eric^[6]、Gullers^[7]和Remington^[8]、Wei^[9]等通过采用建立理论模型,分析了轨面不平顺对轨道结构振动及噪声、轮轨相互作用及车辆动力特性等方面的影响;Hardy^[10]、Cordier^[11]、刘秀波^[12]、Verheijen^[13]、Thompson^[14]及Dings等^[15]采用现场实测的方法对铁路干线轮轨短波不平顺特性及其对轮轨系统动力学等问题进行了研究。由于各地车辆轨道类型、运营和养护方式等因素的差异,相应的轨面短波不平顺分布状况与特性也不同,在开展城市轨道交通减振降噪研究时,对城市轨道交通轨面短波不平顺的分布规律和平顺度进行调查分析是十分必要的。

本文通过对上海城市轨道交通和部分提速线路的轨面短波不平顺进行了现场实测,在对测试数据进行平稳性检验的基础上,进一步分析了轨面短波不平顺的幅值分布特性,并进行了平顺度评价,为城市轨道交通的减振降噪提供数据支持和参考。

1 测试概况

为对城市轨道交通轨面平顺度进行评价,本文采用SEC-RC钢轨电子平直仪对上海城市轨道交通部分线路及我国部分提速线路的轨面短波不平顺进行了实测分析,该仪器为德国施密特钢轨技术有限公司所生产,采样间隔为每米200个测量点,数据来源及样本数如表1所示,现场测试及轨面短波不平顺数据样本如图1和图2所示,测试区段线路状况见表2。

收稿日期:2011-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(50878158);铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心开放基金项目

作者简介:韦红亮(1982—),男,博士研究生,研究方向为轨道结构动力学。



图1 轨面平顺度测试图

Fig.1 Test of rail surface irregularity

表1 轨面不平顺样本分布及数量

Tab.1 Number and distribution of rail surface irregularity

线路类型	线路名称	接头区样本数量/个	非接头区样本数量/个
上海城市轨道交通	1号线	53	—
	2号线	83	—
	3号线	81	76
提速线路	沪宁线	11	136
	沪昆线	28	76

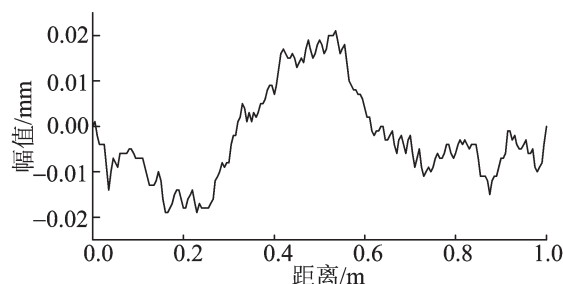


图2 轨面短波不平顺数据样本

Fig.2 Data sample of rail surface short-wave irregularity

表2 测试区段线路状况

Tab.2 Line condition of test line sections

线路类型	线路名称	焊接钢轨形式
上海城市轨道交通	1号线	25 m钢轨,接触焊接
	2号线	25 m钢轨,接触焊接
	3号线	25 m钢轨,接触焊接
提速线路	沪宁线	100 m钢轨,接触焊接
	沪昆线	25 m钢轨,接触焊接

备注:线路为直线区

2 平稳性检验

随机信号的平稳性检验是信号检验中最重要的一种。目的是检查被测随机信号是否属于平稳随机过程,因为测试数据满足平稳性与否直接影响到相应的分析方法。检验方法是通过检验信号的基本物理因素是否随时间变化,若不变,则满足平稳性假设,最常用的平稳性检验方法^[16]有轮次检验和逆序检验。

在轨面短波不平顺测量的过程当中,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区轨面不平顺最大值处,所以测量的结果包含钢轨本身和测量基线所引起的线性趋势项,因此在数据分析和平稳性检验时,应首先消除测量数据中的线性趋势项。文中利用最小二乘法^[17]消除测量数据中的线性趋势项,然后分别采用轮次检验法和逆序检验法对测量结果做平稳性检验,平稳性检验的显著性水平设定0.05,分析结果如表3所示。

表3 轨面不平顺样本平稳性检验通过率

Tab.3 Pass ratio of stability test for rail surface irregularity sample

线路类型	线路名称	接头区/%		非接头区/%	
		轮次检验法	逆序检验法	轮次检验法	逆序检验法
城市轨道交通	1号线	94.3	98.1	—	—
	2号线	96.4	98.8	—	—
	3号线	86.0	100.0	94.7	100.0
提速线路	沪宁线	72.7	100.0	76.5	96.3
	沪昆线	78.6	100.0	73.7	93.4

表3表明,采用轮次检验法对轨面短波不平顺样本进行检验的通过率小于逆序检验法,轨道交通1号线、2号线、3号线、沪昆线和沪宁线的平稳性检验通过率最低分别为94.3%、96.4%、86.0%、72.7%和78.6%,说明将样本中的趋势项消除后,轨面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,即轨面不平顺总体上为平稳信号。

3 轨面平顺度评价

3.1 幅值统计

对各线路焊接接头区和非接头区的轨面短波不平顺最大幅值采用概率统计方法作频率统计分析,结果如表4所示。对于焊接接头区轨面短波不平顺幅值而言,轨道交通1号线的最大幅值在0.3~2.0 mm 范围内分布比较均匀,轨道交通2号线最大幅值主要分布在0.3~0.6 mm 范围内,轨道交通3号线、沪昆线和沪宁线最大幅值主要分布在0.6~1.0 mm、1.0~1.5 mm 和0.3~0.6 mm 范围内;对于非接头区轨面短波不平顺幅值而言,轨道交通3号线、沪昆线和沪宁线最大幅值主要分布在0.1~0.3 mm、0.1~0.3 mm 和0~0.1 mm 的范围内,说明城市轨道交通轨面短波不平顺在幅值上总体大于提速线路,焊接接头区的轨面短波不平顺幅值大于非接头区,100 m焊接长钢轨轨面不平顺的最大顺幅值无论在焊接接头区还是在非接头区均小于25 m 标准焊接钢轨。

表4 轨面不平顺幅值频率统计表
Tab.4 Frequency statistics of amplitude of rail irregularity

幅值区间/mm	接头区					非接头区		
	1号线	2号线	3号线	沪昆线	沪宁线	3号线	沪昆线	沪宁线
<0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	41.5	78.8
0.1,0.3	2.0	8.8	1.7	0.0	14.3	70.8	56.6	21.2
0.3,0.6	22.0	47.1	36.2	27.3	85.7	23.6	1.9	0.0
0.6,1.0	24.0	27.9	60.3	22.7	0.0	2.8	0.0	0.0
1.0,1.5	12.0	14.7	1.7	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5,2.0	18.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
>2.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3.2 轨面平顺度评价分析

目前我国尚未出现针对城市轨道交通车轮踏面和轨面平顺度的评价标准,国际上也主采用BS EN ISO3095 标准^[18]对轮轨短波平顺度进行评价,本文采用该标准对轨道交通轨面平顺度进行评价,其计算式为 $L_r=20\log(r/r_0)$ 。式中: L_r 为轨面平顺度,dB; r 为轨面短波不平顺的均方根值(RMS), μm ; r_0 为参考不平顺幅值, $r_0=1\mu\text{m}$ 。

对焊接接头区和非接头区的轨面短波不平顺分别进行轨面平顺度评价,然后求取其平均值并与ISO3095 限值进行对比,结果如图3~4所示,图中横坐标为对数坐标。

图3表明,不论是城市轨道交通还是提速线路,焊接接头区的轨面平顺度在整个分析波长范围内均不同程度大于ISO3095 所规定的限值,在对轮轨力产生较大影响的波长范围内(0.1~1.0 m),轨道交通1号线、2号线和3号线及沪宁线和沪昆线分别较ISO3095 限值高出25.3,21.7,22.2,17.8,10.2 dB,说明城市轨道交通焊接接头区的轨面不平状态要差于提速线路。

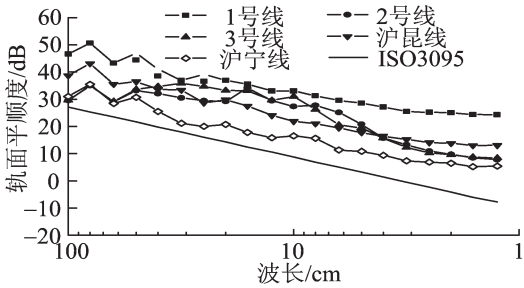


图3 焊接接头区轨面平顺度对比图
Fig.3 Contrast of rail regularity in joint area

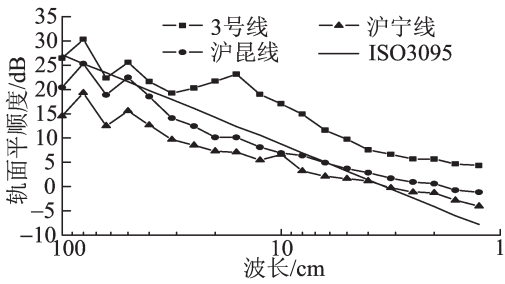


图4 非接头区轨面平顺度对比图
Fig.4 Contrast of rail regularity in non-joint area

图4表明,在0.04~1 m的波长范围内,城市轨道交通3号线接头区的轨面平顺度大于ISO3095所规定的限值,在0.16 m的波长上两者差值为10.8 dB,而提速线路非接头区的轨面平顺度总体上优于ISO所规定的限值,沪宁线和沪昆线分别在0.2,0.32 m波长上与ISO限值的差值达到最大,分别为-4.2和-8.3 dB,也说明城市轨道交通非接头区的轨面不平状态也差于提速线路,提速线路非接头区的轨面平顺度在5~100 cm波长范围内满足ISO3095的要求。城市轨道交通非接头区轨面平顺度状态劣于提速线路,除了养护维修方式有关外,可能还受到因车辆频繁加减速而导致更为严重轮轨相互作用的影响。

为分析同一线路上轨面不平顺的分布状况,将轨道交通3号线、沪宁线和沪昆线的焊接接头区与非接头区的轨面平顺度分别进行对比分析,结果如图5~7所示。图5~7表明(横坐标为对数坐标),在0.04~1 m的波长范围内,不论是城市轨道交通3号线,还是提速线路沪宁线和沪昆线,接头区轨面平顺度均大于非接头区,两者差值范围分别为3.1~16.6 dB、13.6~19.7 dB和8.2~16.4 dB,说明相同线路条件下,接头区的轨面状态要差于非接头区,主要原因是由于接头区钢轨在材质性能等方面存在着较大的差异,在反复轮轨作用力下,常常在焊接接头处及其附近轨顶面出现不均匀的磨耗,而非接头区轨面不平顺的产生主要是由于轨面被机车车辆的车轮擦伤、滑行、及不圆顺车轮的冲击引起。

对于轨面平顺度大于ISO3095限值的线路区段,建议管理部门对其进行振动与噪声评估,以确定是否需要采取养护措施。目前,针对城市轨道交通轨面短波不平顺控制方面我国尚无相应的技术规范,针对城市轨道短波不平顺与轮轨振动噪声的之间的关系开展定量研究十分必要,以为工程处理提供依据。

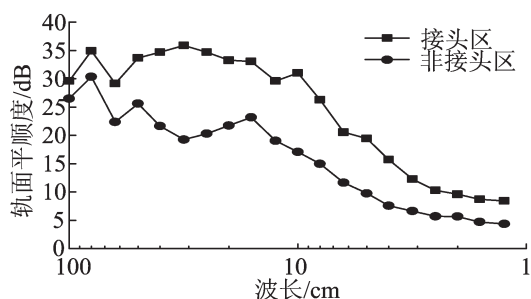


图5 轨道交通3号线轨面平顺度对比图
Fig.5 Contrast of rail regularity of Metro Line 3

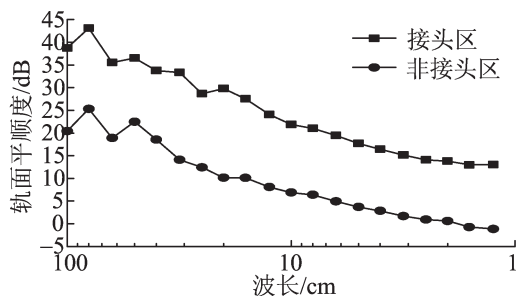


图6 沪宁线轨面平顺度对比图
Fig.6 Contrast of rail regularity in Huning Line

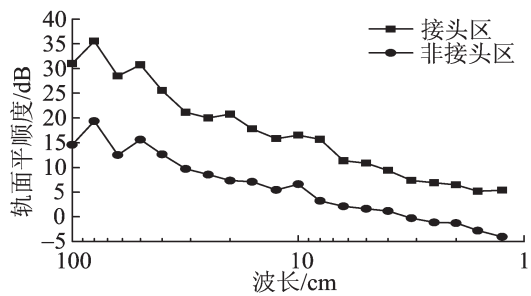


图7 沪昆线轨面平顺度对比图
Fig.7 Contrast of rail regularity in Hukun Line

4 结论与建议

通过对城市轨道交通轨面短波不平顺进行测试分析,可以得出以下结论:

- 1) 将样本中的趋势项消除后,轨面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;
- 2) 城市轨道交通轨面短波不平顺在幅值上总体大于提速线路,焊接接头区的轨面短波不平顺幅值大于非接头区;
- 3) 轨道交通1号线、2号线和3号线及沪宁线和沪昆线焊接接头区的轨面平顺度分别较ISO3095限值高出25.3,21.7,22.2,17.8,10.2 dB,轨道交通3号线、沪宁线及沪昆线非接头区的轨面平顺度与ISO限值的差值分别为10.8,-4.2,-8.3 dB,城市轨道交通的轨面不平状态总体上要劣于提速线路;
- 4) 相同线路条件下,焊接接头区的轨面平顺状态要差于非接头区。

建议进一步对城市轨道交通、提速线路与客运专线的轨面短波不平顺进行试验调查,尤其是开展针对城市轨道交通轨面不平顺与轮轨动力响应之间影响关系的定量研究,以为后续的减振降噪研究提供必要的技术支持。

参考文献:

- [1] 上海铁路局,同济大学. 提速线路钢轨短波不平顺轨道动力学分析及打磨技术研究[R]. 上海:同济大学,2009.
- [2] THOMPSON D J. Train noise and vibration(Mechanisms,Modelling and Means of Control)[M]. Oxford:Elsevier Science Publisher,2009:127-174.
- [3] THOMPSON D J. The influence of the contact zone on the excitation of wheel/rail noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003,267:523-535.
- [4] THOMPSON D J AND REMINGTON P J. The effects of transverse profile on the excitation of wheel/rail noise[J]. Journal of Sound and Vibration,2000,231:537-548.
- [5] WU T X, THOMPSON D J.Theoretical investigation of wheel/rail non-linear interaction due to roughness excitation[J]. Vehicle System Dynamics 2000, 34(4):261-282.
- [6] BERGGREN ERIC G, MARTIN X D, SPANNAR LI JAN. A new approach to the analysis and presentation of vertical track geometry quality and rail roughness[J]. Wear,2008,265:1488-1496.
- [7] GULLERS P,ANDERSSON L,LUNDÉN R. High-frequency vertical wheel-rail contact forces-field measurements and influence of track irregularities[J]. Wear,2008,265:1472-1478.
- [8] Remington P J,Webb J. Estimation of wheel/rail interaction forces in the contact area due to roughness[J]. Journal of Sound and Vibration,1996,193(1):83-102.
- [9] WEI H L, LIAN S L. Analysis of Dynamic Characteristic of Train caused by Rail Head Roughness in Speed-Increase Line [C]//. International Conference on Railway Engineering,Beijing, Science Press, 2010:185-189.
- [10] HARDY A E J, JONES R R K. The influence of real-world rail head roughness on railway noise prediction[J]. Journal of Sound and Vibration ,2006 ,293:965-974.
- [11] CORDIER J F, FODIMAN P. Experimental characterization of wheel and rail surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration 2000, 231(3): 667-672.
- [12] 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.
- [13] VERHEIJEN E. A survey on roughness measurements[J]. Journal of Sound and Vibration , 2006 ,293:784-794.
- [14] THOMPSON D J. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996,193(1):149-160.
- [15] DINGS P C, DITTRICH M G. Roughness on dutch railway wheels and rails[J]. Journal of Sound and Vibration 1996,193 (1):103-112.
- [16] 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003:1-5.
- [17] 王广斌,刘义伦,金晓宏,等. 基于最小二乘原理的趋势项处理及其MATLAB的实现[J]. 分析研究,2005(5):4-8.
- [18] European Committee for Standardization. BS EN ISO3095:2005. Railway applications-acoustics-measurement of noise emitted by rail bound vehicles [S]. London:Standards Policy and Strategy Committee,2005.

Experimental Study on Rail Surface Shortwave Irregularity in Urban Mass Transit

Wei Hongliang¹, Lian Songliang¹, Liu Yang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Shentong Rail Transit Research and Consulting Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: Spot test of rail surface short-wave irregularity in Shanghai rail transit and speed-increasing line is conducted. The amplitude distribution characteristics of rail surface shortwave irregularity analysis are analyzed based on stability test. Roughness of rail surface is analyzed and evaluated using BS EN ISO3095. The results show that rail surface shortwave irregularity meets the stability test requirement of significance level 0.05. Regularity in joint area of Metro Line 1, Metro Line 2, Metro Line 3, the Huning Line and Hukun Line is 25.3, 21.7, 22.2, 17.8 dB, and 10.2 dB higher than the ISO3095 limit respectively. Difference value between ISO3095 limit and non-joint area of Rail Transit Line 3, Huning Line and Hukun Line is 10.8, -4.2 and -8.3 dB. Rail surface roughness in rail transit is worse than that in speed-increasing lines, and the state of rail surface in joint area is worse than that in non-joint area.

Key words: rail surface shortwave irregularity; urban mass transit; stability test; 1/3 octave; spot test