

轨道交通车辆车轮踏面短波不平顺测试与分析

程小平, 练松良, 陈敏敏

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:城市轨道交通轮轨表面短波不平顺是激发线路沿线振动与噪声的主要原因,准确而高效的测量轮轨表面短波不平顺是振动噪声预测、评估及源头控制的重要条件。通过对上海城市轨道交通2号线部分车辆轮踏面不平顺进行现场测试,利用统计分析、1/3倍频和功率谱分析研究了轮踏面不平顺时、频域组成特性。结果表明所测试的轨道交通车辆轮踏面不平顺水平是比较低的,大部分不平顺幅值积聚在 $3 \sim 13 \mu\text{m}$;在短波范围内,波长大于 4.0 cm 时不平顺状态比ISO3095标准要好,小于 2.5 cm 时不平顺状态较标准差;主要波长分布在 $57.7 \sim 95.2 \text{ cm}$,且大部分集中在 $70 \sim 80 \text{ cm}$,平均值为 72.1 cm 。

关键词:轮踏面;短波不平顺;直接测量法;间接测量法;Pits;Spikes

中图分类号:U211 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2010)01-0006-06

0 引言

近年来我国城市轨道交通大力发展,地铁和轻轨在给人们日常生活带来极大方便的同时,引发的振动与噪声问题也越来越成为人们关注的焦点。国内外研究均表明,城市轨道交通振动与噪声主要是由轮轨表面短波不平顺激发的;并且轨道交通振动噪声与轮轨表面短波不平顺幅值之间存在着线性关系^[1]。因此准确而高效的测量轮轨表面短波不平顺是对振动与噪声预测、评估及其源头控制的重要条件。

目前测量轮轨表面短波不平顺的方法可分为两类:直接测量法(Direct Roughness Measurement 简称 DRM)、间接测量法(Indirect Roughness Measurement 简称 IDRM)。

直接测量法(DRM)顾名思义直接用位移传感器(接触式或非接触式)测量轮轨表面短波不平顺幅值沿钢轨长度或轮周方向的分布情况,并借助1/3倍频分析和功率谱分析得出短波不平顺的频域组成情况。钢轨表面不平顺直接测量仪主要有德国SEC-RC钢轨电子平直仪,它的采样间隔为 5 mm ,测量精度为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ ^[2];车轮踏面不平顺直接测量仪由一个相对复杂的系统组成(具体见图1),其主要部件为LVDT线性电压位移传感器^[3]。

间接测量法(IDRM)是由荷兰国家应用科学研究院(TNO) M. G. Dittich 等人2000年在MetaRail项目中提出的,之后在欧洲一些国家得到应用。钢轨表面短波不平顺间接测量法的原理是通过测量轴箱振动加速度或轮轨辐射噪声来反推轨面不平顺^[4];车轮踏面不平顺间接测量法则是通过测量列车引起钢轨轨头竖向振动加速度、钢轨对垂向振动的衰减率谱和列车通过速度三项指标,求出轮轨联合粗糙度谱,然后与钢轨有效粗糙度谱能量相减得到车轮有效粗糙度谱^[5,9]。

在由荷兰、澳大利亚、法国和意大利联合主持的MetaRail项目中,综合应用了直接测量法和间接测量法对分别设置在以上4国的4条试验线路进行了测试,结果表明在满足特定试验条件情况下,两种测量方法测试结果吻合较好^[6]。

间接测量法是一种高效的方法,但是由于技术方面的原因,目前只在欧洲一些国家(如荷兰)得到运用;直接测量法由于其相关理论已相对成熟,因此是大多数国家测量车轮踏面不平顺的主要方法。下文

收稿日期:2009-11-23

作者简介:程小平 男 1985年出生 硕士研究生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878158)

将给出利用直接测量法对上海市城市轨道交通2号线部分车辆车轮踏面粗糙度测试与分析的相关实例。

1 车轮踏面不平顺现场测试

直接测量法实验装置如图1。用千斤顶将车轴轴箱顶起,在轮踏面上离开轮背分别为60、70、80 mm处设置3个平行测点,手工或机械转动车轮进行数据采集。实验装置主要由三部分组成:启动装置、转速信号采集装置、轮踏面粗糙度信号采集装置。

转速信号采集装置主要用来采集车轮转速信号;轮踏面粗糙度信号采集装置主要由LVDT位移传感器和数据采集系统组成。

为了便于数据后处理,直接测量法粗糙度信号采集过程中,空间采样频率须为一恒值。转速信号采集装置就是通过采集车轮的转速信号,并实时的反馈给数据采集系统,以此来保证空间采样间隔为一恒定值。如果实验装置中没有转速信号采集装置,则在驱动车轮时应保证车轮匀速转动,这样才能保障在恒定的时间采样频率条件下得到恒定的空间采样频率。

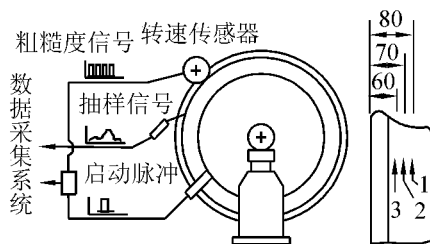


图1 直接测量法实验装置图(单位:mm)

2 数据预处理

和IDRM相比,DRM涉及到较多的数据后处理过程,这些过程除了消除趋势项、数据中心化、数据平滑外,还包括剔除Pits和Spikes。并且数据预处理效果直接影响到后期时、频域分析效果和最终结论。因此对于DRM来说,数据预处理是一个很重要的环节。

2.1 Pits和Spikes的影响

Pits指车轮踏面上很小的孔洞(它与轮踏面上的Squats和细微龟裂有关),这些小孔对轮轨噪声没有影响,但是对1/3倍频和功率谱中的高频部分影响很大(Pits越深,对高频部分影响越大)^[1,4]。由于测试时所采用的传感器探头曲率比轮踏面曲率大得多,因此轮踏面上不会激发振动与噪声的细节也被记录下来。

Spikes是指测试波形中出现的峰值很大的毛刺,它可能是由干扰引起的,也可能是由附着在轮踏面上的细小颗粒产生的。Spikes不反映轮踏面实际粗糙度情况,并且也会对1/3倍频和功率谱中的高频部分产生明显的影响^[1,4]。

图2、图3为上海城市轨道交通2号线龙阳路车辆段第0250号车022651号车厢后转向架前轴右轮测点3和左轮测点3实测数据在含有和剔除Pits、Spikes情况下所做的1/3倍频对比图。图中含有Pits、Spikes的1/3倍频曲线在频率相对较高的部分明显高于剔除时的情况。

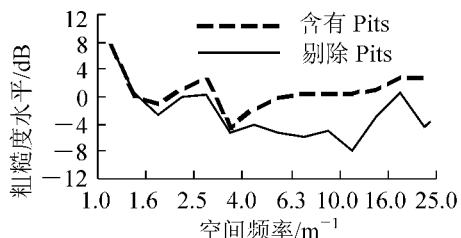


图2 含有和剔除Pits 1/3倍频对比

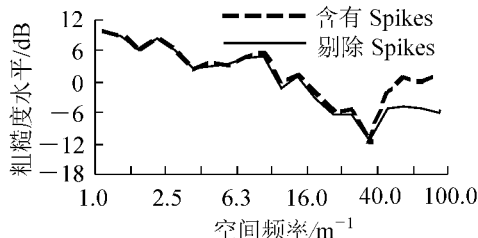


图3 含有和剔除Spikes 1/3倍频对比

图4、图5分别为含有和剔除Pits情况下,功率谱在低频和高频部分的对比图。由图知当频率相对较低时两者功率谱曲线差异不是很大(图4);当频率相对较高时含有Pits的功率谱曲线明显高于剔除Pits后的情况(图5)。

因此,在对数据进行时、频域分析之前必须将数据序列中的Pits和Spikes去掉。

2.2 填平Pits和剔除Spikes的方法

图6中原始不平顺为实测得到的轮踏面不平顺数据波形。其中一个个小尖角P为Pits,它使原始曲

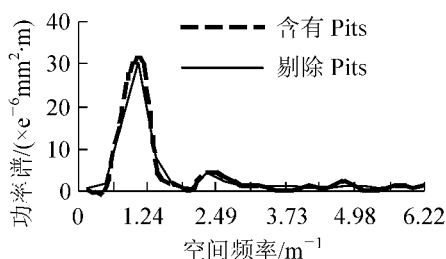


图 4 含有和剔除 Pits 低功率谱对比

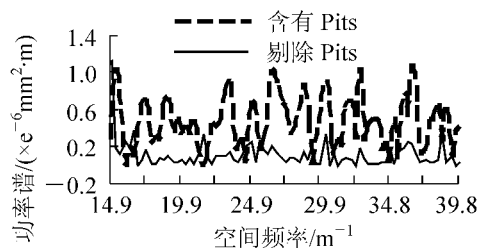


图 5 含有和剔除 Pits 高功率谱对比

线显得很光滑;尖峰 S 为 Spikes, 它为原始数据中的异常值。

2.2.1 填平 Pits

填平 Pits 方法的思想是模拟用具有与车轮相同曲率的传感器对不平顺数据进行重采样, 所得结果为原始数据序列的一部分。

模拟过程如图 6 所示: 与车轮同曲率的重采样传感器 T 沿着原始数据波形移动, 其中能够与 T 接触的点所组成的数据序列即为填平 Pits 后的数据序列^[4]。

实际数据处理中, 将理想车轮的曲率数据叠加到原始不平顺数据中, 形成实际车轮; 找到实际车轮与水平面接触的的第一个点, 并确定其高度 d_0 ; 旋转车轮至下一个数据点, 求出该点的接触高度 d_1 , 判断是否与水平面接触, 以此类推求出车轮旋转一周的接触点序列, 该序列即为填平 Pits 后的数据序列^[1]。当利用该方法编制计算机程序时, 可以将其等效为图 7 的算法。该算法依次将各数据点 i 放在坐标原点, 通过求取其左、右侧各 j 个点的纵坐标值来判断数据点 i 是不是 Pits。

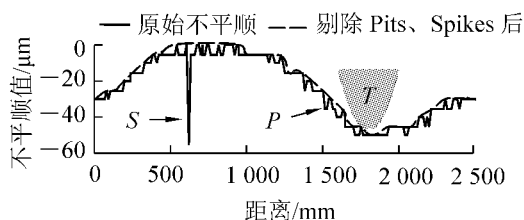


图 6 填平 Pits 和 Spikes 前后波形对比

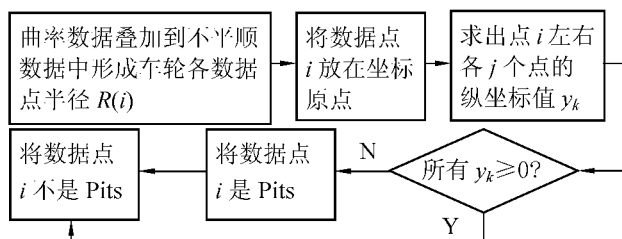


图 7 填平 Pits 流程图

2.2.2 剔除 Spikes^[4]

剔除 Spikes 最直接可靠的方法是人工对每组测试数据进行排查, 发现异常值就将其剔除。由于目前国内外还没有专门的文献对 Spikes 判定标准做出规定, 因此在剔除 Spikes 过程中, 只能凭经验判断哪些数据点是 Spikes。

当数据量较大时, 也可以通过约定 Spikes 判定条件, 利用计算机程序剔除 Spikes。具体操作流程如图 8 所示, 其中 a 为依据实测数据人为约定的 Spikes 斜率阈值。由于 Spikes 是数据序列的突变值, 其斜率较大, 往往接近 1, 故 a 可以取 0.7 以上。然而斜率接近于 1 的不一定都是 Spikes, 还要看它是否远大于它附近区域的其他数据, 图 8 中放大系数 f , 就是用来判断可能的 Spikes 是否远大于它附近区域其他数据。

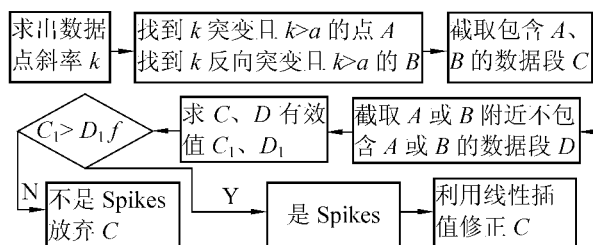


图 8 剔除 Spikes 流程图

3 数据分析与评价

数据分析主要包括时域分析和频域分析两个方面。时域分析主要是不平顺幅值统计分析, 目的是掌握所研究车轮踏面总体粗糙度水平; 频域分析包括 1/3 倍频分析和功率谱分析, 旨在从频率细节上把握

不平顺频域构成情况^[10]。

3.1 数据分析方法理论

不平顺幅值统计分析在时域波形中找出各个车轮不平顺数据的波峰、波谷最大值,并对其进行频数统计。

1/3 倍频谱分析是将各中心频率 f_c 附近的频带内信号进行能量平均,得出中心频率 f_c 的能量。频带内信号处于下限频率 f_l 和上限频率 f_u 之间, f_l, f_c, f_u 满足关系式(1)。

$$f_c/f_l = 2^{1/6}, f_u/f_c = 2^{1/6}, f_u/f_l = 2^{1/3} \quad (1)$$

国际电工委员会(IEC)推荐 $f_c = 1\,000 \times 10^{3n/30}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$),实际运用中,取其近似值 $f_c = 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10, \dots$

轮踏面粗糙度水平利用式(2)计算^[11]

$$L_r = 20 \lg(r/r_0) \quad (2)$$

式中, r 为给定波长频带粗糙度均方根; r_0 为参考值,取 $1\ \mu\text{m}$ 。

1/3 倍频谱分析反映的是中心频率附近的平均水平,用1/3 倍频谱分析结合 EN: ISO 3095—2005^[11]相关规定能够对车轮整体踏面不平顺做出评价。

平稳随机信号序列自功率谱是其自相关函数的傅里叶变换,如式(3)所示。

$$S_X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

式中, $R_X(t) = EX(t_0)X(t_0 + t)$ 为平稳随机过程的自相关函数。

功率谱反映各个频率组成部分对总能量贡献的大小,因此可以清晰地辨识出敏感频率。

进行频域分析时应先对数据进行功率谱分析,得出车轮踏面不平顺敏感波长;再利用1/3 倍频分析,结合 EN: ISO 3095—2005 对轮踏面各个频段和整体粗糙度情况做出评价。

3.2 数据分析实例

3.2.1 时域分析

图9、图10 分别为不平顺时域幅值统计图和频数统计图。由图可知大部分轮踏面不平顺幅值积聚在 $3 \sim 13\ \mu\text{m}$ 范围内,最大值为 $40\ \mu\text{m}$,平均值为 $12\ \mu\text{m}$;并且轮踏面凹、凸不平顺状态相当。

因此从总体上说,所测量的上海城市轨道交通2 号线车轮踏面不平顺状态是较好的。

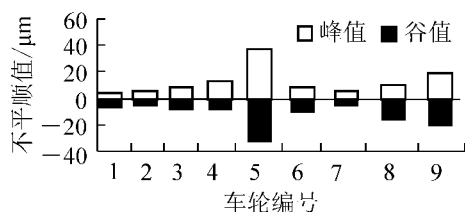


图9 幅值统计图

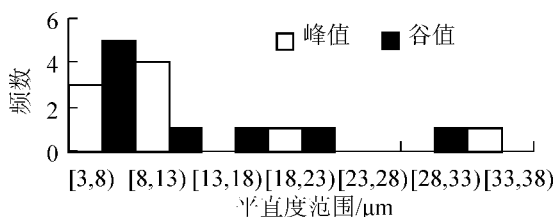


图10 频数统计图

3.2.2 频域分析

图11、图12 为上海城市轨道交通2 号线214 号车第01071 号车厢前转向架后轴左轮踏面不平顺功率谱图。图11 表明在全频率范围内不平顺主要频率为 $0.656\,3\ \text{m}^{-1}$,对应敏感波长为 $1.52\ \text{m}$,属于中波不平顺范围;滤除波长大于 $1\ \text{m}$ 的成分得到图12,该图表明,在短波范围内车轮不平顺的主要频率为 $1.313\ \text{m}^{-1}$,对应敏感波长为 $76.16\ \text{cm}$ 。

图13 为轮踏面不平顺1/3 倍频图。分析该图可知,车轮踏面不平顺状况在短波范围内随波长变化很明显。波长越长车轮不平顺状态越好;反之较差。车轮在波长为 $2.50 \sim 4.00\ \text{cm}$ (尤其是在 $3.15\ \text{cm}$ 左右)时处于不平顺状态较好和较差的临界状态;在波长为 $5.00 \sim 100\ \text{cm}$ 时不平顺状态较好;波长为 $0.40 \sim 2.00\ \text{cm}$ 时则很差。

利用上述方法对所有车轮踏面不平顺数据进行时、频域分析,得到表1 分析结果(表中临界波长为1/3倍频谱线与标准谱线相交时对应的波长;平滑波长为车轮圆顺度很好时所对应的波长;粗糙波长为车

轮圆顺度较差时所对应的波长。))。

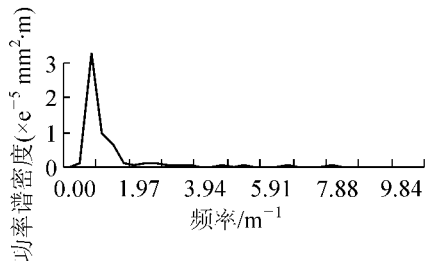


图 11 滤除中波前的功率谱

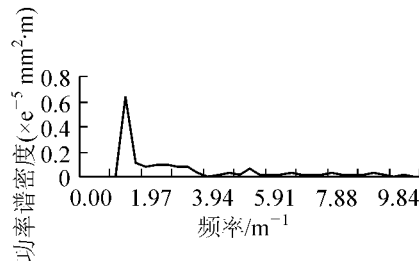


图 12 滤除中波后的功率谱

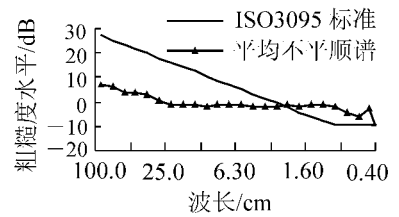


图 13 不平顺 1/3 倍频图

表 1 分析结果统计表

轮位	临界波长	平滑波长	粗糙波长	中波主要波长	短波主要波长	最大不平顺值/ μm	
						凸	凹
1	3.15	3.15 ~ 100	未测到	173	57.7	3.9	7.0
2	2.0 ~ 4.0	5.0 ~ 100	未测到	140	92.4	5.7	5.9
3	2.5 ~ 4.0	5.0 ~ 100	未测到	130	37.3	8.1	7.5
4	< 3.15	3.15 ~ 100	未测到	152	76.2	12.7	7.6
5	2.5 ~ 4.0	5.0 ~ 100	0.4 ~ 2.0	122	69.6	36.9	32.1
6	2.5 ~ 4.0	6.3 ~ 100	未测到	140	70.4	8.3	9.4
7	3.15 ~ 6.3	10.0 ~ 100	未测到	116	69.6	4.8	5.4
8	4.0	10.0 ~ 100	0.4 ~ 2.5	143	95.2	10.4	15.8
9	3.15	5.0 ~ 100	未测到	107	80.4	18.9	19.9

4 结论

通过对表 1 数据进行分析,得到以下结论:

(1)所测量的上海市城市轨道交通 2 号线车辆车轮踏面不平顺水平是比较低的,大部分踏面不平顺幅值积聚在 3 ~ 13 μm 范围内,平均水平为 12 μm 左右。

(2)在短波范围内,波长越长车轮踏面不平顺状态越好;反之越差。其中 2.5 ~ 4.0 cm 波长为不平顺状态好与坏的临界波长;平滑波长为 5.0 ~ 100 cm;粗糙波长为 0.4 ~ 2.0 cm。

(3)车轮踏面中波不平顺主要频率分布在 1.07 ~ 1.73 m 范围内,平均值为 1.4 m;短波不平顺主要频率分布在 57.7 ~ 95.2 cm 范围内,且大部分集中在 70 ~ 80 cm,平均值为 72.1 cm。

参 考 文 献

- [1]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.
- [2]李秋玲,练松良. 城市轨道交通焊接接头不平顺研究与分析[J]. 石家庄铁道学院学报:自然科学版,2009, 22(3):20-23.
- [3]Dings P C, Dittrich M G. Roughness on DUTCH railway wheels and rails [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1):103-112.
- [4]Cordier J F, Fodiman P. Experimental characterization of wheel and rail surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 667-672.
- [5] F G de Beer, Jansen H W, Dittrich M G. STAIRRS level 2 measurement methods: indirect roughness and transfer function, STAIRRS report[R]. TNO; Delft, 2002.
- [6]Wirnsberger M, Dittrich M G, Lub J, et al. Methodologies and actions for rail noise and vibration control [R]. TNO;Delft, 2000.
- [7]Dittrich M G, Janssens M H A. Improved measurement methods for railway rolling noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 595-609.

(下转第 46 页)

Three DOF Operating Model of Three-Axle Vehicle Considering Body Roll

Zhang Wei, Feng Guosheng, Jia Sumei

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The operating model of three DOFs for three-axle vehicle is derived in detail in this paper based on the operating model of two DOFs for three-axle using the method of Lagrange. The method also applies to other multi-axle vehicles. The method of calculating the rotate speed of every wheel is given for the three-axle vehicle with the vehicle palstance known.

Key words: three axle vehicle; operating model; three degrees of freedom; heeling

(上接第 10 页)

- [8] Janssens M H A, Dittrich M G, F G de. Beer, et al. Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 1007-1028.
- [9] Janssens M H A, Jansen H W, Dittrich M G. Evaluation of the interim measurement protocol for railway noise source description [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 1029-1040.
- [10] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [11] Technical Committee CEN/TC256. ISO3095:2005 Railway applications-acoustics-measurement of noise emitted by railbound vehicles[S]. Switzerland: [s. n.], 2005.

Measurement and Analysis of Wheel Surface Short Wavelength Irregularity of Rail Transit Vehicle

Cheng Xiaoping, Lian Songliang, Chen Minmin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Short wavelength irregularity of wheel/rail surface is the main reason of vibration and noise of railway alongside vicinity. Therefore, measuring the short wavelength irregularity of wheel/rail surface accurately and efficiently has a profound influence on prediction, assessment and source-controlling of vibration and noise. Based on the field-measured wheel surface roughness data of trains running in Line 2 of Shanghai Urban Rail Transit, such methods as statistics analysis combined with one-third octave analysis and PSD analysis have been employed in this paper. Through this research, the below conclusions are drawn: In time domain, the peak value of most wheels' roughness range from $3\mu\text{m}$ to $13\mu\text{m}$. In frequency domain, when the wavelength of irregularity exceeds 4.0 cm, the one-third octave value is much smaller than the ISO3095 standard, which means the wheel surface is rather smooth; however, when the wavelength is below 2.5 cm, the one-third octave value exceeds the standard. The main wavelengths which devote most to the PSD range from 57.7 cm to 95.2 cm. Especially, most of them are in the range from 70 cm to 80 cm, averaged 72.1 cm.

Key words: wheel surface; short wavelength irregularity; DRM; IDRM; Pits; Spikes