

地铁车辆段试车线车致振动特性实测与分析<sup>\*</sup>闫宇智<sup>1,2</sup> 邵 斌<sup>1</sup> 丁德云<sup>1</sup> 李 腾<sup>1</sup> 高 岩<sup>1</sup> 马广轩<sup>1</sup> 周海斌<sup>3</sup>

(1. 北京九州一轨环境科技股份有限公司, 100070, 北京; 2. 北京市基础设施投资有限公司, 100101, 北京;

3. 北京市轨道交通运营管理有限公司, 100070, 北京//第一作者, 工程师)

**摘 要** 以某地铁车辆段试车线列车运行的振动特性为主要研究对象, 实测了列车以不同速度出入库时所引起的轨道区、地面区和室内区的振动加速度响应。从时域和频域角度分析了振动传播特性。结果表明: 轨道区振动以高频成分为主, 且随振动传播过程衰减较快; 随着列车速度的增加, 各测点的振动强度整体呈现增大趋势, 但地面和室内测点的振动小于 63 Hz, 列车速度对振动强度的影响较小; 对钢轨竖向振动加速度响应进行 Z 振级时变分析, 可获得列车的编组和速度信息, 分析时长对最大 Z 振级的影响高达 5 dB 左右。建议: 试车线的昼间试车速度不应超过 45 km/h, 新建试车线与住宅区的距离应不小于 30 m。

**关键词** 地铁车辆段; 试车线; 车致振动; 传播特性

**中图分类号** U270.1+1; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.028

## Field Measurement and Analysis of Characteristics of Vehicle induced Vibration on Metro Depot Testing Line

YAN Yuzhi, SHAO Bin, DING Deyun, LI Teng, GAO Yan, MA Guangxuan, ZHOU Haibin

**Abstract** Taking the train operation vibration characteristics on testing line of certain metro depot as the main research object, the vibration acceleration response of track area, ground area and indoor area caused by train operation at different speeds is measured. The vibration propagation characteristics are systematically analyzed in time and frequency domain. Results show that vibration in track area is mainly composed of high frequency component, which decays rapidly through propagation process. With the increase of running speed, the vibration intensity of each measuring point shows an overall increasing trend, but the ground or indoor measuring points are in the frequency range lower than 63 Hz, the impact of train speed on vibration intensity is small; the time-varying analysis of Z-vibration level is carried out on the rail vertical acceleration response to obtain information about train formation and train

speed. The impact of analysis time on the maximum Z-vibration level can reach 5 dB. It is suggested that the train test speed on testing line in daytime should not exceed 45 km/h, and the distance between test line and residential area should not be less than 30 m in subsequent construction.

**Key words** metro depot; testing line; vehicle vibration; propagation characteristics

**First-author's address** Beijing Jiuzhouyigui Environmental Technology Co., Ltd., 100070, Beijing, China

由于土地资源比较紧张, 地铁车辆段上盖及周边的综合规划开发已经成为了一种行业趋势<sup>[1]</sup>。然而, 车辆段上盖及其周边开发区域内的振动噪声源强且复杂, 建筑物与轨道交通线路距离较近, 容易产生振动噪声问题。这些问题已成为制约地铁上盖综合开发的关键技术难题<sup>[2]</sup>。

为此, 国内外很多专家学者针对地铁周边的振动传播特性进行了系统研究。文献[3]对列车通过波士顿地区铁路时产生的振动进行了现场测试, 分析了地铁列车振动对周边环境振动的影响特性; 文献[4]分别对广州地铁 3 号线厦滘车辆段咽喉区的曲线段和直线段进行了测试, 分析了列车运行对周边地面振动的影响规律, 在进行减振设计时, 建议优先考虑降低振动的低频成分; 文献[5]对地铁运营引起的低频振动(<20 Hz)进行了实验室试验, 并采用时程、频谱、加速度级和传递函数等指标分析了低频信号的传播规律; 文献[6]以北京地铁某曲线段为主要研究对象, 现场测试了距离线路中心线 100 m 范围内的振动特性, 并采用时频域方法对测试结果进行了分析。

以上研究均是基于地铁正线、车辆段咽喉区等区域进行的现场测试和研究。截至目前, 鲜有针对车辆段试车线振动传播规律的研究。然而, 地铁车

\* 国家自然科学基金资助项目(51678032)

辆段试车线作为地铁列车进行动态调试和试验的线路<sup>[7]</sup>,试车期间频繁加减速运行,容易产生振动超标的问题。这会对周边居民的生活造成极大干扰。为此,本文以某地铁试车线列车运行的振动特性为主要研究对象,进行了现场测试,从时域和频域角度系统地分析了地铁列车以不同速度通过试车线时,轨道区、地面和室内的振动衰减规律,可为地铁车辆段试车线的减振设计提供参考。

## 1 测试方案

### 1.1 工程概况

某地铁车辆段周边居民楼众多,为了进一步了解试车线正常运营对周边环境产生的振动影响,特开展本次测试。试车线区域为碎石道床轨道,并全线安装了钢轨阻尼器。

### 1.2 测点布置

测试地点主要包括车辆段试车线轨道区、地面区和小区室内等 3 个区域。其中车辆段试车线与该小区仅一墙之隔。所有区域均只测试竖向加速度响应,测点布置示意图如图 1 所示。

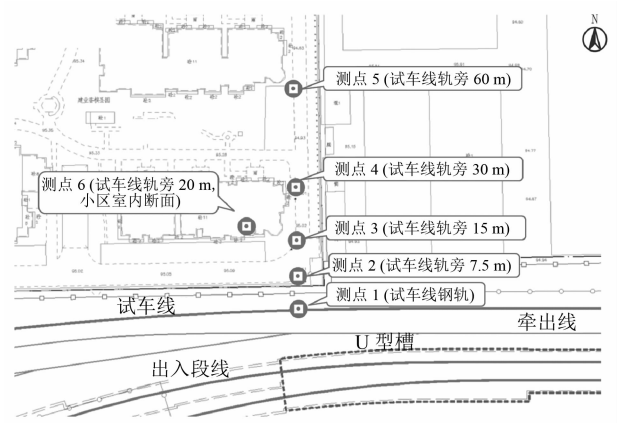


图 1 测点布置示意图  
Fig. 1 Layout of test section

测点 1 为轨道区,主要测试钢轨竖向加速度;测点 2~5 为地面区,主要测试距离试车线 7.5 m、15 m、30 m 和 60 m 位置处地面振动的衰减规律;测点 6 为小区室内,该测点距离试车线线路 20 m,位于建筑物的首层,主要测试建筑物室内的振动情况。

### 1.3 测试工况

测试过程中,列车分别以不同速度匀速通过试车线。所有测试均采用同一列列车在试车线上往返运行,总计 16 个往返。详细测试工况及其测试顺序如表 1 所示。本次试验选取空载 B 型列车,6 节编组。

表 1 测试工况表		
Tab. 1 Test working conditions		
工况号	车速/(km/h)	出、入库情况
1~5	15	出,入,出,入,出
6~9	25	出,入,出,入
10~14	30	出,入,出,入,出
15~17	35	出,入,出
18~22	45	入,出,入,出,入
23~24	50	出,入
25~27	55	入,出,入
28~32	60	入,出,入,出,入

## 2 测试结果的时域分析

列车以 15 km/h 的速度匀速通过试车线时,测点 1、测点 2 和测点 6 的竖向加速度响应时程如图 2 所示。测点 1、测点 2 和测点 6 的竖向振动加速度响应的有效值分别为 1.201 m/s<sup>2</sup>、0.013 m/s<sup>2</sup> 和 0.002 m/s<sup>2</sup>。

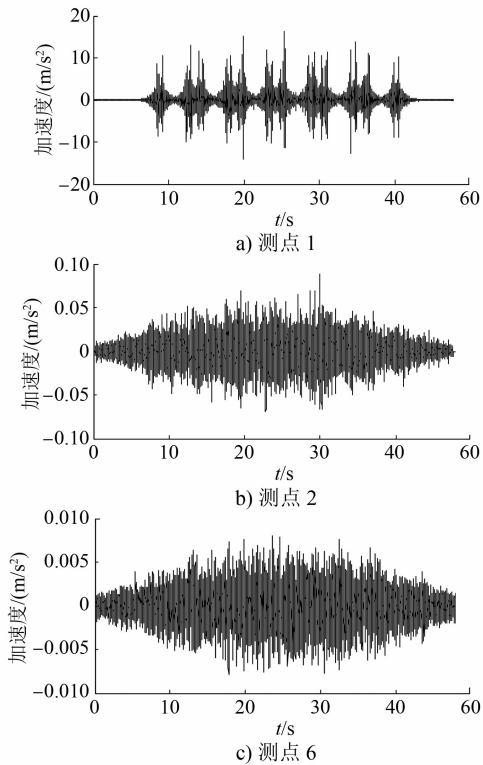


图 2 各测点竖向振动加速度响应时程图  
Fig. 2 Time history diagram of vertical acceleration response of each measuring point

从图 2 中可以看出:①钢轨竖向振动加速度最大,约为室外地面振动加速度峰值的 100~200 倍,而室外地面振动加速度峰值约为室内振动加速度峰值的 10 倍;②对比室内和室外地面的振动加速度

响应,室内振动强度明显低于室外地面振动强度,这是因为建筑物整体质量较大,会降低振动对结构物的影响,且住宅区基础一般都施加了减振措施,也会在一定程度上降低室内的振动强度。

列车以不同速度匀速通过试车线时,分别将测点 1、测点 2 和测点 6 在列车出库和入库时的振动加速度有效值进行汇总,见图 3。

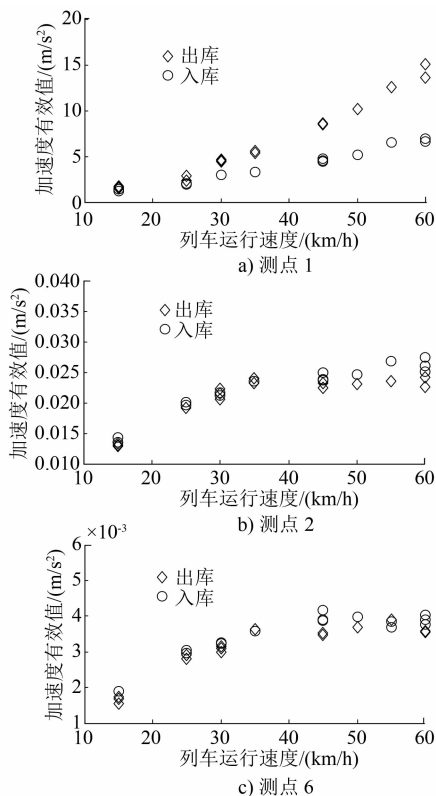


图 3 各测点振动加速度有效值

Fig. 3 Effective value of acceleration of each measuring point

从图 3 可以看出:①随着列车速度的增加,列车出库和列车入库的各测点竖向振动加速度有效值整体均呈增大趋势,但局部也有减小的可能;②同一列车速度条件下,列车出库时的钢轨竖向振动加速度有效值明显大于列车入库时的,说明钢轨的振动强度与轨道不平顺、线路整体状态、司机驾驶习惯等均具有一定关系,也说明钢轨振动特性具有一定的随机性;③除钢轨竖向振动加速度外,同一列车速度条件下,列车出库和列车入库时其他测点的竖向振动加速度有效值相差不大,说明振动幅值的随机性在沿着地面传播过程中逐步减弱。

为了分析列车振动在地面的衰减规律,对不同车速作用下测点 2~6 的竖向振动加速度响应有效值进行汇总,对相同速度级的工况进行平均化处

理,处理结果如图 4 所示。

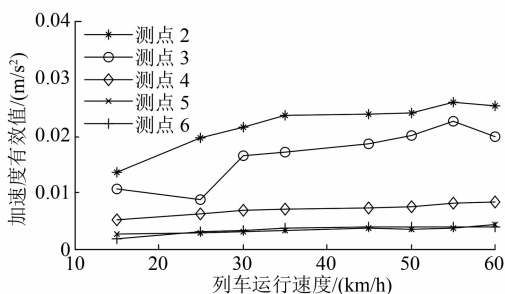


图 4 各测点振动加速度峰值统计图

Fig. 4 Statistical chart of peak acceleration of each measuring point

从图 4 可见:①随着车速的增加,各测点的竖向振动加速度有效值整体呈现增大趋势;②各列车速度工况下,各测点的竖向振动加速度有效值随着与振源距离的增加而减小;③对比测点 3 和测点 6,二者的振源距离相差不大,但室内振动加速度峰值明显小于室外的。

### 3 测试结果频域分析

通过对测试结果进行时域分析,可得到各测点在不同条件下的振动加速度有效值统计结果。但时域分析结果容易受到周边振动信号的干扰,随机性较大。频域分析结果相对稳定,且对后续环境振动评估更为直接和方便。因此,本节从振动加速度级、Z 振级时变特性和分频最大振级等频域指标的角度对测试结果进行分析。

#### 3.1 振动加速度级

对所测的振动加速度时程数据进行傅里叶变换,可得到 1/3 倍频程中心频率的振动加速度级,其计算方法见文献[8]。基于传感器设计精度及采样频率等方面的考虑,本文在进行频率分析时,中心频率的分析范围为 4~400 Hz。因钢轨振动频率相对较高,在该分析频段内无法分析其振动特性,因此在分析中暂不考虑测钢轨振动的测点 1。

根据时域分析结果可知,当列车以相同速度出库和入库时,地面测点和小区室内测点的竖向振动加速度有效值相差较小。为分析各测点在出入库时频率分布的差异,绘制列车以 15  $\text{km/h}$  的速度通过试车线时测点 2 和测点 6 的振动加速度级 1/3 倍频程图,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,地面测点和小区室内测点的振动加速度级在全频段几乎完全吻合,说明在振动

传播过程中,信号低频成分更加稳定。

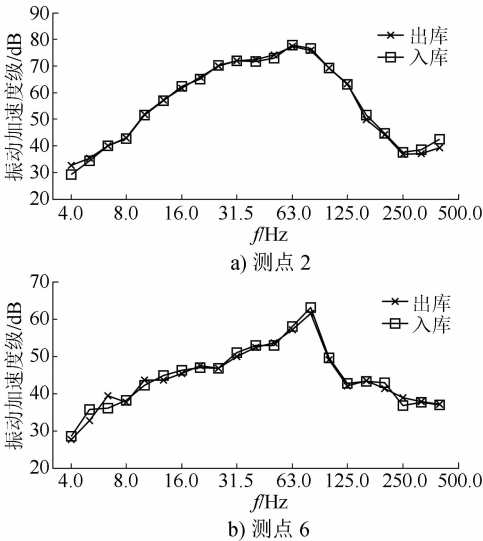


图 5 各测点的振动加速度级对比  
Fig. 5 Comparison of vibration acceleration levels of each measuring point

为分析地面测点和小区室内测点的振动加速度级与列车运行速度的关系,绘制列车分别以 15 km/h、30 km/h、45 km/h 和 60 km/h 速度通过试车线时测点 2 和测点 6 的振动加速度级 1/3 倍频程图,如图 6 所示。

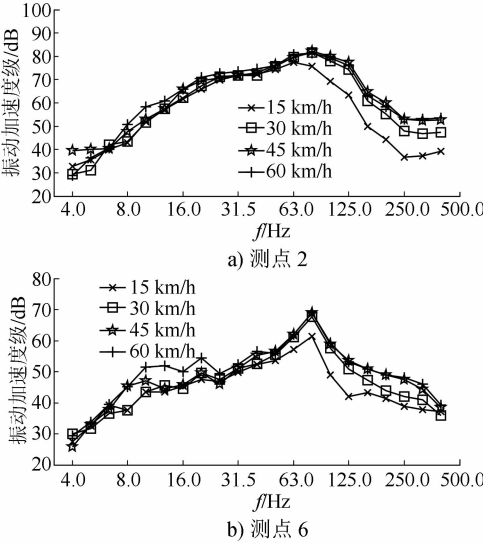


图 6 车速对各测点振动加速度级的影响  
Fig. 6 Influence of vehicle speed on vibration acceleration level of each measuring point

由图 6 可见:地面测点和小区室内测点的振动响应在小于 63 Hz 时,列车速度对振动加速度级的影响较小;当振动响应大于 63 Hz 时,随着列车速度的增加,振动加速度级逐渐增大。

为分析同一振源条件下,各测点的振动衰减规律,当列车以 15 km/h 的速度通过试车线时,测点 2~6 的振动加速度级衰减特性如图 7 所示。

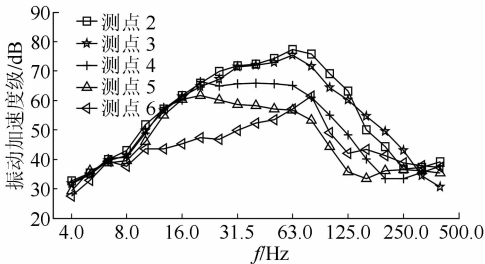


图 7 各测点振动加速度级衰减特性图  
Fig. 7 Attenuation characteristics diagram of vibration acceleration level of each measuring point

由图 7 可以得出:①随着测点与振源距离的增加,室外测点的高频成分迅速衰减,低频成分则传播得更远,因此,在做减振设计时需要重点考虑低频成分;②室内测点振动较室外的小,其振动加速度级最大值为 80 Hz,该频率峰值是由列车通过建筑物周边引起的强振频率与建筑物结构自振频率的耦合引起的。

振动加速度级总级值是各频带振动加速度级的总级值,可以间接反映各信号的振动总强度,其计算方法见文献[9]。为分析列车以不同速度通过试车线时各测点的振动强度关系,对同一列车速度下的工况进行平均化处理,振动加速度级总级值的计算结果如图 8 所示。

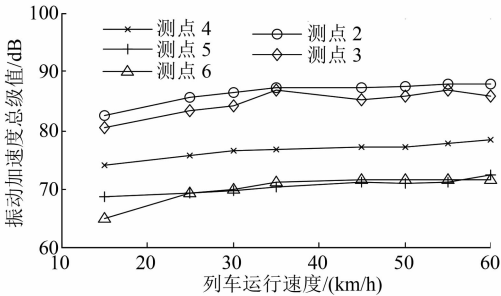


图 8 各测点振动加速度总级值统计图  
Fig. 8 Statistical chart of total level value of vibration acceleration at each measuring point

由图 8 可见:①随着列车运行速度的增加,振动加速度级的总级值逐渐增大,但整体增大幅度较小;②随着与振源距离的增加,列车以不同速度通过试车线时的振动加速度总级值均逐渐减小;③各速度条件下,室外测点 3 的振动加速度级均大于与振源距离相近的室内测点 6 的,相差可达 10 dB。

### 3.2 Z 振级时变分析

Z 振级是指按照 GB 10071—88《城市区域环境振动测量方法》的相关规定,将前述的振动加速度级采用全身振动 Z 记权因子修正后得到的数值,记为  $V_{Lz}$ ,其中 Z 记权的记权方法参照 GB/T 13441.1—2007《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价》,其频率范围为 0~80 Hz。这是频域分析方法中最能体现局部时间区域内振动强度的指标。

对各竖向加速度响应时程进行 Z 振级时变分析时,首先选取 0~ $t$  时间段进行第一次 Z 振级时变分析,得到总值;随后选取  $\Delta t \sim (t+\Delta t)$  时间段进行第二次 Z 振级时变分析(其中  $t$  为分析时长, $\Delta t$  为分析偏移量)。分析过程的示意图如图 9 所示。

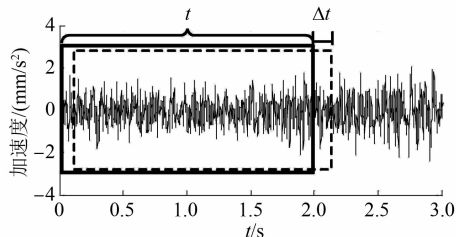


图 9 Z 振级时变示意图

Fig. 9 Time varying diagram of Z-vibration level

当列车以 30 km/h 的速度匀速通过试车线时,测点 1、测点 2 和测点 6 的 Z 振级时变结果如图 10 所示(分析过程中, $t$  选为 2 s, $\Delta t$  选为 0.1 s)。

由图 10 可看见:①当列车通过试车线时,钢轨测点竖向加速度的 Z 振级增加最大,其次为地面测点的,增加最少的为小区室内测点的。②当列车车轮经过测点时,会出现明显波峰,当测点断面在某列车的前、后转向架之间时,会出现明显波谷;根据 Z 振级时变分析结果可得到该列车为 6 节编组。B 型列车的车长为 22 m,根据第一组轮对和最后一组轮对的时间差,可计算得到该列车通过试车线的速

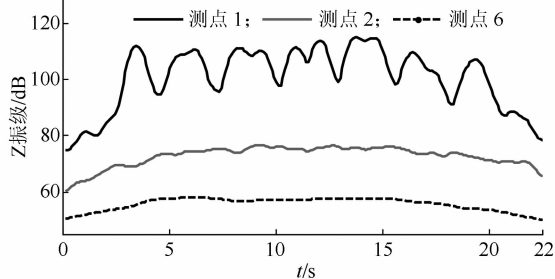


图 10 各测点 Z 振级时变结果对比

Fig. 10 Comparison of Z-vibration level time-varying analysis results of each measuring point

度约为 29.88 km/h,与设定速度 30 km/h 相差不大。③列车通过地面测点和小区室内测点时的 Z 振级并无明显增大,无法从信号中识别列车编组和列车运行速度。

对于钢轨竖向加速度测点,为了分析列车运行速度对 Z 振级时变分析结果的影响, $t$  依然选为 2 s, $\Delta t$  依然选为 0.1 s。当列车分别以 15 km/h、30 km/h 和 60 km/h 的速度通过试车线时测点 1 的 Z 振级时变结果如图 11 所示。

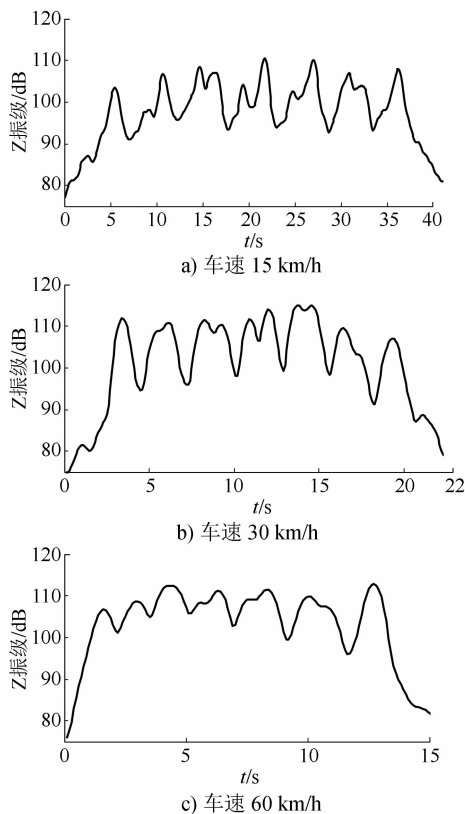


图 11 不同车速下钢轨 Z 振级时变结果对比

Fig. 11 Comparison of time varying analysis results of rail Z-vibration level at different vehicle speeds

由图 11 可看见,当列车速度为 15 km/h 时,较难识别该列车编组和列车运行速度;当列车速度为 30 km/h 和 60 km/h 时,可准确识别列车编组和列车运行速度。

当列车以 15 km/h 的速度通过试车线时,为了分析计算参数对钢轨 Z 振级时变结果的影响,保持  $\Delta t=0.1$  s 不变,分别将  $t$  设定为 1 s、2 s 和 4 s,Z 振级的计算结果如图 12 a) 所示;保持分析时长  $t=2$  s 不变,分别将  $\Delta t$  设定为 0.4 s、0.2 s 和 0.1 s,Z 振级的计算结果如图 12 b) 所示。

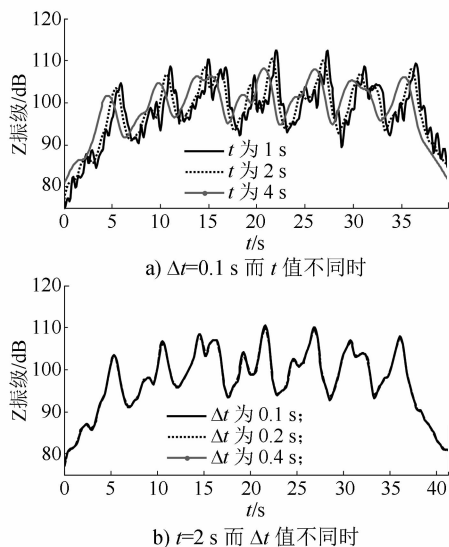


图 12 计算参数对钢轨 Z 振级时变分析的影响

Fig. 12 Influence of calculation parameters on time-varying analysis of rail Z-vibration level

由图 12 可看见:①保持  $\Delta t$  不变,  $t$  越短, Z 振级的峰值越大;②随着  $t$  的缩短, 列车车轮经过测试断面时的局部特性越发明显, 这是因为  $t$  即为每次参与 Z 振级计算的数据量长度, 如果选取较大  $t$ , 会掩盖信号的局部特性;③保持  $t$  不变,  $\Delta t$  的变化对 Z 振级的计算结果影响较小。

需要注意的是, 虽然较短的  $t$  可得到更好的局部特性测试结果, 但较短的  $t$  会降低时变分析的波形平稳性, 大大增加计算量, 降低了工作效率。因此, 为了兼顾识别精度和计算效率, 在实际计算过程中, 需选取更为合理的  $t$ 。

最大 Z 振级表示 Z 振级在所有  $t$  中的最大值, 反映了整个时间域信号在某一  $t$  值内的局部振动特性。为了分析不同速度级下各测点最大 Z 振级与  $t$  的关系, 保持  $\Delta t = 0.1$  s 不变, 将列车分别以 15 km/h、30 km/h、45 km/h 和 60 km/h 的速度通过测试断面时, 测点 1、测点 2 和测点 6 的最大 Z 振级计算结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出:①随着  $t$  的减小, 各信号的最大 Z 振级也逐渐增大, 且增大的幅值也逐渐增大, 采用不同  $t$  进行计算时, 最大 Z 振级的计算值最大相差 5 dB 左右;②随着列车运行速度的增加, 各测点的最大 Z 振级整体呈现增大趋势。

### 3.3 实测与标准限值的对比分析

根据 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》规定:居民、文教区属于二类区域, 室外的最大

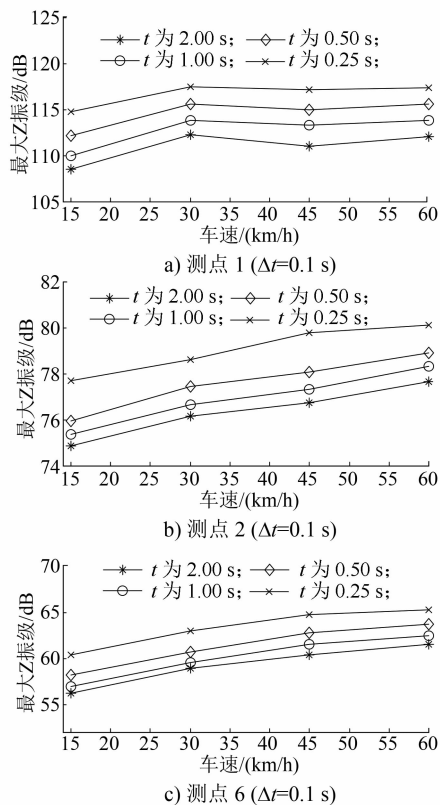


图 13 不同测点在不同  $t$  值时最大 Z 振级

Fig. 13 Maximum Z-vibration level at different measuring points and  $t$  values

Z 振级的昼间标准值为 70 dB, 夜间标准值为 67 dB。根据 JGJ/T 170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法》规定:居民、文教区室内的分频最大振级的昼间标准为 65 dB, 夜间标准为 62 dB。根据上述规定, 现将现场实测值与规范限值对比结果列于图 14 中。

从图 14 可以看出:①对地面测点采用二类区域进行评估时, 随着速度级的增大, 各测点的  $V_{Lz, \max}$  整体均呈现增大趋势;②测点 2、测点 3、测点 4 在各类速度级下的  $V_{Lz, \max}$  均超过昼间和夜间标准, 测点 5 在车速小于 45 km/h 的情况下满足昼间标准;③对于小区室内测点, 各个时速的所有测点均未超过二类区域的评估标准。

根据以上分析可得:当列车以小于 60 km/h 的速度通过试车线时, 室内的振动基本可满足规范要求;为了确保室外环境振动达标, 该类型试车线与住宅区的距离建议不应小于 30 m, 且在昼间的试车速度不应超过 45 km/h。

需要说明的是, 本评估结果仅是针对振动这一单项指标进行的, 而在实际车辆段建设过程中,

需综合考虑其他指标,尤其应重点关注试车线道岔的减振降噪对策,最终给出更为合理的设计方案。

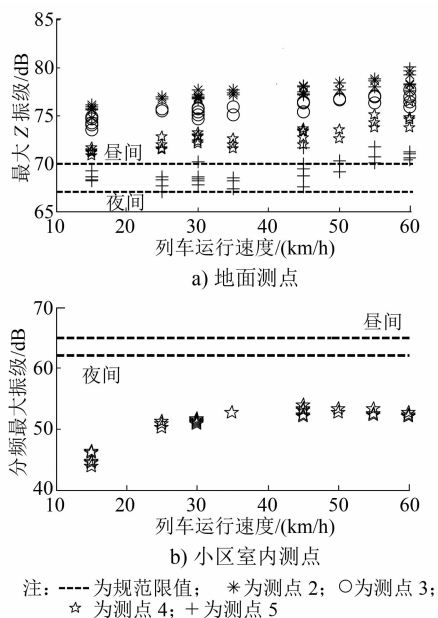


图 14 不同测点实测值与规范限值对比图

Fig. 14 Comparison between measured values and standard limits at different measuring points

## 4 结语

1) 车辆引起的振动在轨道区以高频成分为主,且随机性较大,随着振动沿着轨道、地面、室内方向传播,高频成分衰减较快,低频成分传播得更远,随机性逐渐减小。在轨道减振设计时,应优先考虑低频成分。

2) 随着列车速度的增加,各测点的振动强度整体呈现增大趋势,地面和室内测点的振动频率小于 63 Hz 时,列车速度对振动强度的影响较小。

3) 测量不同列车速度下的钢轨竖向振动加速度时,选取合理的  $t$  和  $\Delta t$ ,即可得到对应的列车的编组和速度信息。 $t$  对  $V_{Lz,max}$  的影响大于  $\Delta t$ 。对同一信号采用不同  $t$  值进行计算时,  $V_{Lz,max}$  的计算值最大可相差 5 dB。

4) 该试车线目前需在昼间使用,且试车速度不应超过 45 km/h。在后续其他车辆段建设过程中,试车线与住宅区的距离建议应不小于 30 m。

## 参考文献

- [1] 林楚娟,戚月昆,邢诒,等. 地铁车辆段试车线振动传播规律[J]. 都市快轨交通,2015(5):77.  
LIN Chujuan, QI Yuekun, XING Yi, et al. Propagation law of vibration from test line in metro depot[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015(5):77.
- [2] 丁德云. 城轨上盖开发振动噪声专项治理新模式初探[J]. 中国环保产业,2019(10):255.  
DING Deyun. Initial exploration on new model for vibration and noise special control of upper structure development in urban rail transit[J]. China Environmental Protection Industry, 2019(10):255.
- [3] SANAYEI M, MAURYA P, MOORE J A. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways[J]. Engineering Structures, 2013, 53:102.
- [4] 邹超,汪益敏,王朝晖,等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击,2015(16):200.  
ZOU Chao, WANG Yimin, WANG Zhaohui, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(16):200.
- [5] 丁德云,刘维宁,李克飞,等. 地铁运营引起的环境低频振动传播特征试验研究[J]. 中国铁道科学,2011(2):20.  
DING Deyun, LIU Weining, LI Kefei, et al. Experimental study on the transmission characteristics of low-frequency vibrations induced by metro operation[J]. China Railway Science, 2011(2):20.
- [6] 袁扬,刘维宁,刘卫丰,等. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. 中国铁道科学,2012(4):133.  
YUAN Yang, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Propagation law of ground vibration in the curve section of metro based on in-situ measurement[J]. China Railway Science, 2012(4):133.
- [7] 张雄,李剑虹. 论地铁车辆段试车线的功能及设计要求[J]. 铁道工程学报,2008(6):101.  
ZHANG Xiong, LI Jianhong. Study of metro depot train test line function and design requirements[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(6):101.
- [8] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社,2010.  
XIA He. Traffic induced environmental vibrations and controls[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2010.
- [9] 吕玉恒,燕翔,魏志勇,等. 噪声与振动控制手册[M]. 北京:化学工业出版社,2019.  
LYU Yuheng, YAN Xiang, WEI Zhiyong, et al. Handbook of noise and vibration control[M]. Beijing: Chemical Industry Press Co., Ltd., 2019.

(收稿日期:2021-02-10)