

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.016

# 山区地形条件下高架轨道交通引起 地面振动实测研究\*

杨金川<sup>1,2</sup>, 丁选明<sup>1,2</sup>, 瞿立明<sup>1,2</sup>, 崔春义<sup>3</sup>, 龙永红<sup>1,2</sup>, 巫崇荣<sup>1,2</sup>

- (1. 重庆大学山城城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;
3. 大连海事大学土木工程系, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 考虑地形对轨道交通振动衰减的影响, 对重庆轻轨6号线经过典型斜坡及陡崖地形的高架段进行现场测试。分析了振动频谱特性以及振动速度级沿轨道中心线及45°、90°三个方向的衰减规律。研究结果表明: 列车引起地面振动主要频率分布在50 Hz两侧附近, 各距离处频率分布不受地形影响; 地表振动从桥墩承台传至周围土体中会出现较大的放大; 振动沿斜坡和陡崖衰减速度慢于平面, 在平面上衰减先快后慢, 在斜坡方向则先慢后快, 同时地面振动随距离衰减呈现出波动性, 在90°方向距轨道中心线13 m附近出现了振动放大区; 列车运行具有明显的偏载效应, 近轨列车引起振动在承台上随距离增大, 远轨列车引起振动随距离减小。

**关键词:** 地形; 振动; 高架桥; 现场测试; 轨道交通

**中图分类号:** U233 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0133-07

## Field Tests on Ground Vibration Caused by Viaduct Rail Transit under Mountainous Terrain Conditions

YANG Jinchuan<sup>1,2</sup>, DING Xuanming<sup>1,2</sup>, QU Liming<sup>1,2</sup>, CUI Chunyi<sup>3</sup>,  
LONG Yonghong<sup>1,2</sup>, WU Chongrong<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing 400045, China;
3. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Considering the influence of terrain on the vibration attenuation of rail transit, field tests were carried out on the viaduct section of Chongqing Light Rail Line 6 passing through typical slopes and cliffs. The vibration Spectrum characteristics and the attenuation of vibration velocity level in three directions are analyzed, including 0, 45, and 90 degrees from the track center line. The results show that the main frequencies of ground vibration caused by trains are distributed around 50 Hz and the frequency distribution at various distance is not affected by terrain. Ground vibration will be amplified

\* 收稿日期: 2018-12-16; 修回日期: 2019-04-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(51622803, 51708064)、重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttx0003)资助

**作者简介:** 杨金川(1993—), 男, 硕士研究生。主要从事轨道交通环境振动研究。E-mail: yjc201229@163.com

**通讯作者:** 丁选明(1980—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事土力学与地基基础工程、土动力学与工程振动方向的教学与科研。E-mail: dxmhhu@163.com

greatly when it is transmitted from the pier cap to the surrounding soil. The decrease of vibration is slower along slope and steep cliff than that on the plane, which decays obviously and then slowly on the plane. However, it decays slowly and then quickly on the slope. At the same time, the ground vibration shows fluctuation with distance attenuation. There is a vibration amplification zone near the distance of 13 m in the direction of 90 degrees from track center line. The train operation has obvious eccentric load effect and the vibration on the pier cap caused by the near-track train increases with the distance, while the vibration caused by the remote-track train decreases with the distance.

**Keywords:** terrain; vibration; viaduct; field test; rail traffic

## 引 言

随着城市人口的增加以及城市的不断发展,轨道交通已经成为解决城市拥堵的一种重要交通手段。在国家实施“十三五”规划期间,城市轨道交通迎来了又一快速发展时期,在运营规模、全年客运量、在建线路及规划线路长度等方面均创历史新高。据统计,截止2017年末,全国共计34个城市开通城市轨道交通并投入运营,运营线路长度达到5 032.7公里,其中高架线为1 093.4公里,占比21.7%<sup>[1]</sup>。

轨道交通在给城市居民带来便利的同时,引发的环境振动也成为了一种新的城市病。人们长期处于城市环境振动中会扰乱正常工作生活节奏并引发健康问题,同时振动会影响振源附近精密设备的使用寿命。针对日益突出的环境振动问题,国内外学者做了大量的研究工作。李小珍等<sup>[2-3]</sup>通过现场测试研究了高架列车的周期性加载现象;罗忆等<sup>[4]</sup>借鉴萨道夫斯基公式,研究了重载列车引起桥墩周边地面振动的传播与衰减规律;高广运等<sup>[5]</sup>把引起地面振动的列车轮轴荷载等效为多点源的叠加,并对《动力机器基础设计规范》<sup>[6]</sup>中地面振动衰减公式的参数进行调整,得到了可以预测列车引起的较远距离地面振动的衰减公式。陈建国等<sup>[7]</sup>对比了列车在减振轨道和普通轨道上运行引起地表振动的特性差异,研究发现减振轨道对高频范围的振动能起到减振效果,但对与其自振频率相近的振动却起到了放大作用;S.H.Ju等<sup>[8]</sup>采用时域三维有限元方法分析了高速列车速度在土体瑞利波速上下时的地基响应。C.Madshus等<sup>[9]</sup>在瑞典的一个软土地场进行了现场测试,发现当列车速度接近某一明显的临界值时,铁路、路堤、地面系统的动态响应会出现很大的动态放大。W.Zhai等<sup>[10]</sup>首次详细分析

了北京-上海超高速(300~410 km/h)列车在路堤无碴轨道上运行引起的地面垂直振动的振动特性;A.Yaseri等<sup>[11]</sup>通过结合有限元与边界元建立三维模型研究了地下列车引起的地表振动。

上述研究在振动响应特性、振动衰减规律方面取得许多有意义的成果,但地形对地面振动响应特性及振动衰减的影响研究尚少。在山区城市,轨道交通线路不可避免的会穿越复杂地形,因此,研究地形对轨道交通振动衰减的影响具有重要意义。本文通过对重庆轨道交通6号线穿越某典型山地地形的高架段引起的地面振动进行实测,分析了轨道交通振动沿不同地形表面的衰减规律及振动特性。

## 1 试验概况

重庆轨交6号线始于南岸区,终于北碚区,是轨道交通线网中贯通重庆东南城区与西北城区的骨干线路。重庆轨交6号线采用钢轨钢轮B型地铁制式,主线全长约61公里,设有车站28座,包括高架站6座,地下站22座。测试段位于南岸区茶园刘家坪站至上新街站之间并靠近刘家坪的高架段,测试地点距离刘家坪轻轨站约600 m,测试区域在高架桥的两座桥墩附近。现场桥墩承台上表面与土体表面齐平,承台尺寸长宽为8.8 m×6.5 m,桥墩长宽为3 m×2.5 m。

现场分别测试了与轨道中心线呈45°、90°以及两桥墩轨道中心线上三个方向上不同距离处的振动,各方向速度传感器布置如图1所示。在图1(b)中,与轨道中心线呈90°方向(D1方向)上存在斜坡地形,斜坡坡度为23°,其中测点S1、S10、S11位于桥墩承台上,测点S14、S15位于斜坡上。图1(c)中与轨道中心线呈45°方向(D2方向)为水平地面,各测点位于同一标高上,其中S1、S18位于桥墩承台上。图1(d)中两桥墩之间轨道中心线方向上(D3

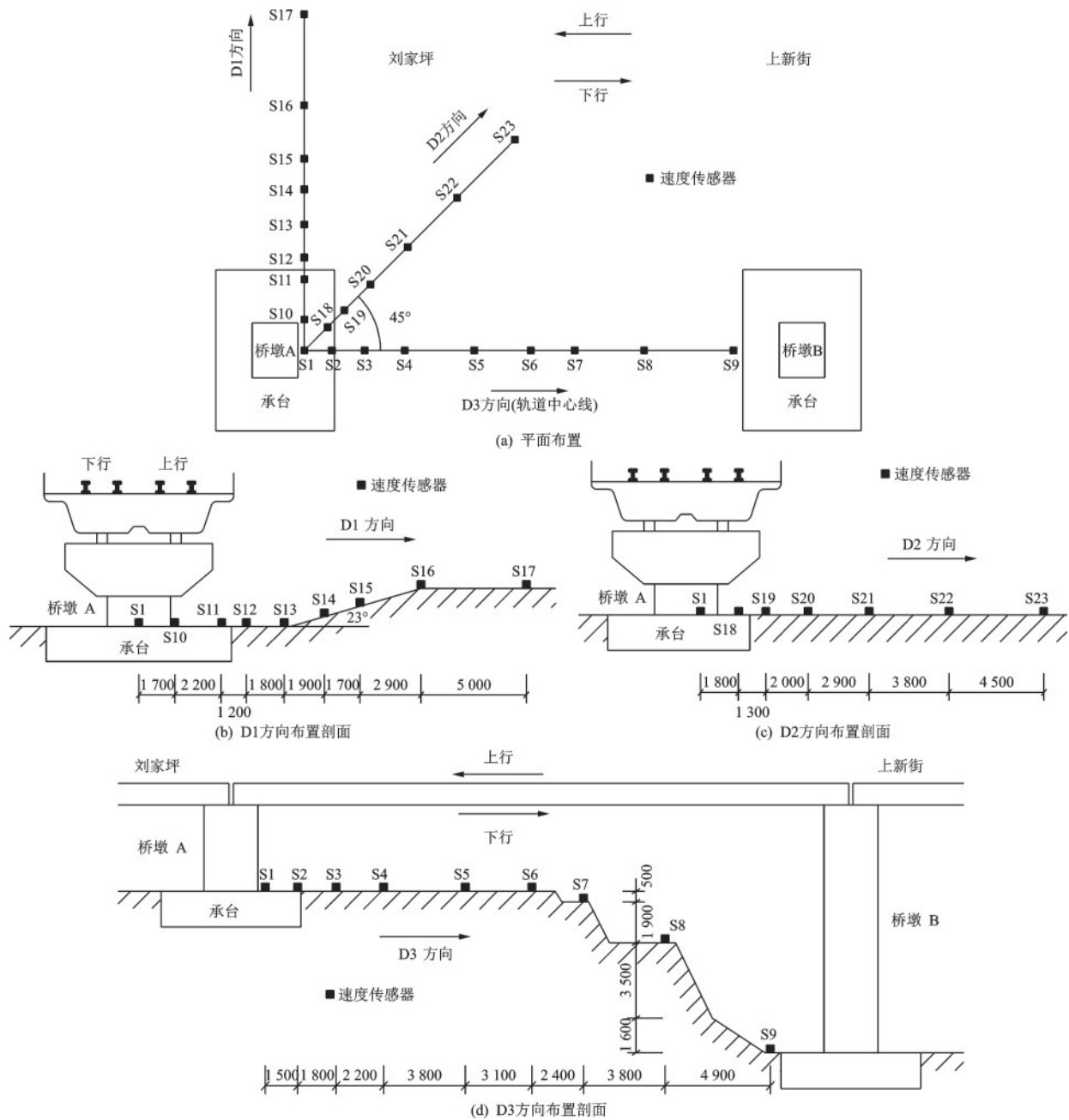


图1 速度传感器布置示意  
Fig.1 Arrangement of the velocity sensors

方向)存在陡崖地形,测点S6、S7、S8分别位于不同高度崖阶上,测点S1、S2位于承台上,两桥墩承台高差为7.5 m。取得测试现场地质土层资料见表1,该土层资料的钻孔位于桥墩A附近,其中强风化带岩石岩质软,岩芯较破碎,风化裂隙较发育。

试验数据采集使用带有64通道的东华测试DH5921型数据采集仪,以及配套的DHDAS动态信号采集分析系统,地面速度拾振器采用东华测试研制的2D001V型传感器。地面传感器布置时,首先将地面土体平整夯实,再将石膏粉加水搅拌至粘

表1 现场土性参数

Table 1 Soil properties at the test site

土层	土厚/ m	含水率/ %	重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	承载力/ kPa	压缩(弹性 模量)/MPa
粉质黏土	0.5	23.4	19.7	160	5.14
强风化岩	2.9	—	—	300	—
砂岩	17.9	4.71	23.6	1 200	4 466

稠状并均匀涂抹于测点,然后将传感器用力压至与石膏紧密连接,使传感器方向与振动方向一致,且传感器几何轴线保持横平竖直。试验荷载为载客

运营列车,速度传感器采样频率为 200 Hz,列车运行速度为 60~75 km/h,上行列车即将进站处于减速行驶阶段,下行列车出站处于加速行驶阶段。地表质点速度的测量通常是在三个互相垂直的方向,包括竖向、水平径向和横向。许多研究表明轨道交通引起的地表振动以竖向为主,因此本文采用竖向振动进行研究,所用传感器均为竖向速度传感器。受速度传感器数量的限制,测试分两批次进行,D1方向为第一批,D2、D3方向为第二批。

## 2 地面振动评价指标

国际上常用振动级来评价振动的大小,描述振动的主要物理量有振动位移级、振动速度级及振动加速度级<sup>[12]</sup>。人体受地面振动的影响主要是振动能量传递引起的,因此相比于振动位移级,振动加速度级和振动速度级能更好的反映该特性。本文则采用振动速度级来评价地面振动的大小。振动速度级<sup>[11]</sup>定义:

$$VAL = 20\lg(v_{\text{rms}}/v_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中,VAL为振动速度级(dB); $v_{\text{ref}}$ 为基准振动速度,在欧洲 $v_{\text{ref}}$ 取 $10^{-8}$  m/s,在美国 $v_{\text{ref}}$ 取 $2.54 \times 10^{-8}$  m/s,文献[13]取为 $10^{-9}$  m/s,本文采用 $v_{\text{ref}}=10^{-9}$

m/s; $v_{\text{rms}}$ 为所测振动速度有效值,根据文献[14]其表达式为:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^T v^2(t) dt}{T}} \quad (2)$$

式中, $v(t)$ 为速度时程函数(mm/s); $T$ 为振动采样时间长度(s)。

为了反应轨道交通引起地面振动的实际影响,振动速度级采用消除背景振动的公式<sup>[15]</sup>:

$$VAL = 10\lg\left(10^{\frac{VAL_A}{10}} - 10^{\frac{VAL_B}{10}}\right) \quad (3)$$

式中,VAL表示消除背景振动后的振动速度级; $VAL_A$ 表示含背景振动的振动速度级; $VAL_B$ 表示背景振动的振动速度级。

## 3 试验结果分析

### 3.1 时程及傅里叶谱分析

为获得高架轨道交通列车运行引起地表振动的响应特性以及在土体中的传播规律,选取斜坡D1方向具有代表性测点进行时程及傅里叶谱分析。所选测点距轨道中心线距离分别为 5.1、8.8、13.4 m,各测点的时程曲线及傅里叶谱如图 2~3 所示。

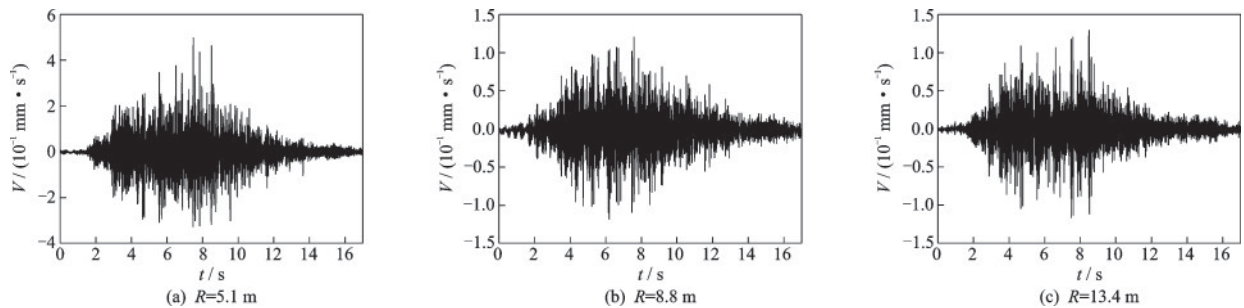


图2 测点时程曲线

Fig.2 Time history of the measuring points

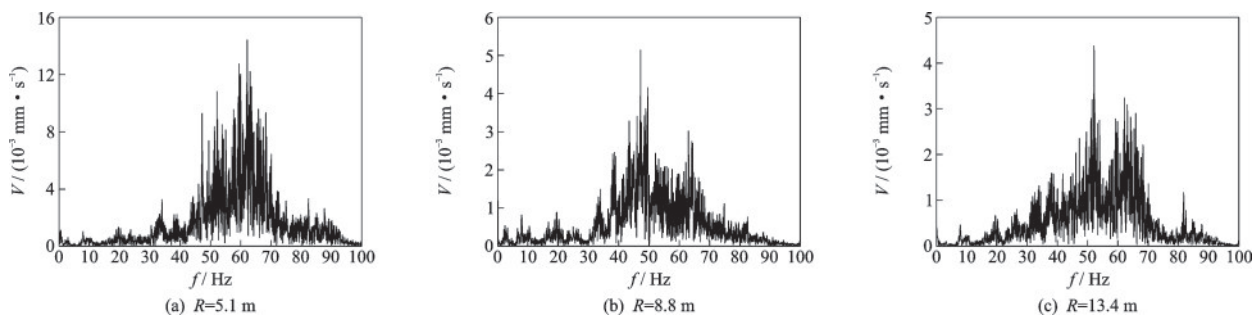


图3 测点傅里叶谱

Fig.3 Fourier's spectrum of the measuring points

从图2中各测点速度时程曲线可以看出:列车引起地面振动持续时间约15 s,速度峰值随着距离轨道中心线距离的增加而逐渐衰减,这是由于能量在土体中传播时由于土体阻尼及能量扩散,致使地面振动逐渐衰减。各距离测点速度峰值分别为0.498、0.121、0.129 mm/s,在13.4 m处振动大小略大于8.8 m处,这是由于在13 m附近存在振动放大区。研究<sup>[16]</sup>表明,振动放大区是由土体表面波传播过程中与土体下部基岩顶面的反射波和折射波叠加形成的。

对比图3中各测点傅里叶谱,在 $R=5.1$  m处,地面振动主要频率范围为30~95 Hz,最优频率为62 Hz。在 $R=8.8$  m处,地面振动速度主要频率范围为40~70 Hz,其中最优频率为47 Hz,振动幅值显著减小,主要频率范围也减小。当 $R=13.4$  m时,主要频率范围为45~70 Hz,最优频率为52 Hz。可见,随着距离增加振动幅值逐渐减小,各测点主要频率分布范围减小,但分布区域仍较为一致。

### 3.2 振动速度级衰减分析

为得出振动沿不同地形表面的衰减规律,将所测速度时程按式(1)~(3)计算得到各距离处振动速度级VAL。选取上下行D1、D2、D3方向具有代表性的各两组数据计算结果绘制如图4~6所示。

对于D1方向,从承台到承台周围土体中,振动有明显放大,这是由于承台与土体相互作用以及承台与土体性质差异导致承台附近土体振动放大。对于上行列车,振动在承台上随距中心线距离呈增大趋势,而对于下行列车,振动则在承台上呈减小趋势,这表明列车运行具有明显的偏载效应。下行列车(远轨)运行速度大于上行列车(近轨),引起的地表振动较上行组明显大。上下行列车引起地面振动的衰减规律一致,振动在土体中随距离波动衰

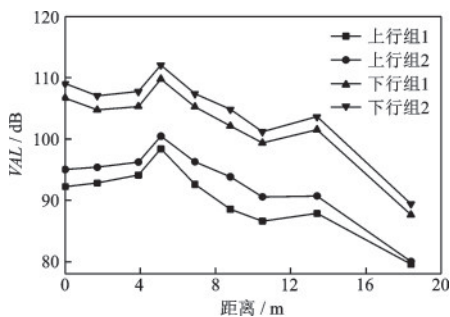


图4 D1方向速度振级衰减

Fig.4 Attenuation of vibration velocity levels in direction D1

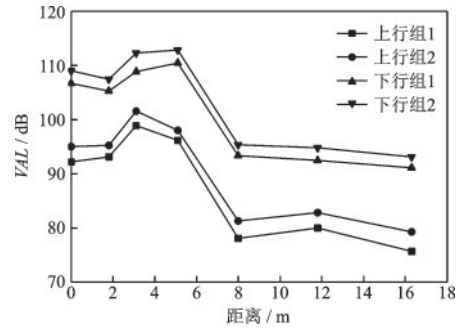


图5 D2方向速度振级衰减

Fig.5 Attenuation of vibration velocity levels in direction D2

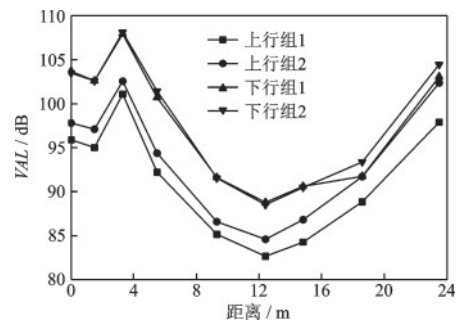


图6 D3方向速度振级衰减

Fig.6 Attenuation of vibration velocity levels in direction D3

减,在13 m附近出现了振动放大的情况,振动放大区位于斜坡坡顶。文献[17]指出振动放大区出现距离受隧道埋深、地层条件的影响。在13 m后振动沿坡顶则快速衰减,整体呈现出沿坡面衰减较慢,在坡顶平面衰减较快的趋势。

对于D2方向,从墩承台到承台周围土体中,振动也有明显的放大,但下行列车引起的振动放大区域较上行列车更广。振动在5~8 m迅速衰减至较小值,振级衰减约17.4 dB,在8 m之后衰减较为缓慢,振动呈现出显著的先衰减快后衰减慢的特点。上行列车引起的振动在12 m附近出现振动放大区,而下行列车引起的振动在该区域并未出现振动放大区,其原因有待进一步研究。

对于D3方向,由图6可知振动从承台到土体中也存在明显的放大。速度振级沿轨道中心线从两桥墩向中间快速衰减,在靠近两桥墩中间位置处振动最小。速度振级从S3向S6衰减速度为2.1 dB/m,从S9向S6衰减速度为1.4 dB/m,可见振动沿陡崖坡底向坡顶衰减速度慢于振动在平面上的衰减速度。

对比三个方向的振动可以发现,振动在D1、D2、D3三个方向的振级变化范围均为75~115 dB,下行加速列车引起的振动明显大于减速且速度较

低的上行列车。三个方向振动从承台传至周围土体中会出现明显的放大。对比三个方向的衰减规律,发现D1方向在斜坡上的衰减速率慢于另外两个方向在平面上的衰减速率,D3方向振动沿陡崖的衰减速率也慢于沿平面的衰减速率。

与文献[7]报道的平原地形振动衰减规律相比,山区地形条件下振动衰减同样存在放大区,但出现放大区的位置各有不同,平原地形下振动越大放大越明显,这与D1方向规律一致,但与D2方向规律相反。同时两种地形下振动衰减快慢的区域也不相同。

### 3.3 速度振级三分之一倍频程分析

为研究地面振动能量在不同频率区间的分布情况,以及不同频带振动强度随距离的变化规律,将所测振动速度时程变换到频域内进行三分之一倍频程分析<sup>[15]</sup>。将选取三个方向的上下行各两组时程数据变换到频域内,再将变换后上行两组、下行两组数据分别进行线性平均,得到D1、D2、D3方向速度振级三分之一倍频程如图7~9所示。

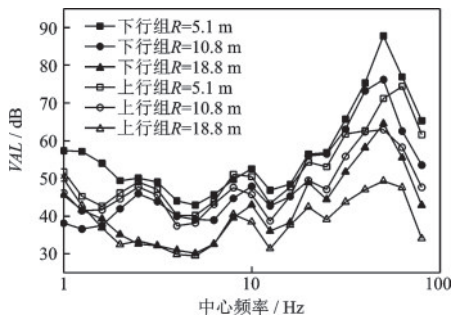


图7 D1方向速度振级1/3倍频程

Fig.7 1/3 Octave band vibration velocity levels in direction D1

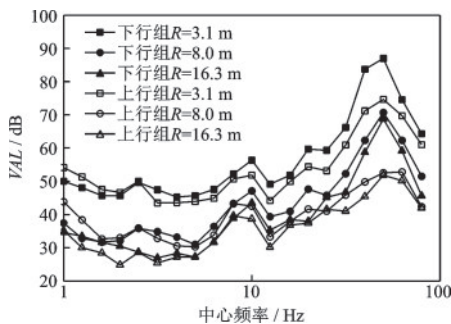


图8 D2方向速度振级1/3倍频程

Fig.8 1/3 Octave band vibration velocity levels in direction D2

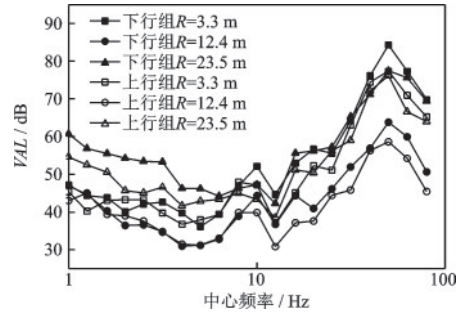


图9 D3方向速度振级1/3倍频程

Fig.9 1/3 Octave band vibration velocity levels in direction D3

在D1方向上,振动的主要频率分布在50 Hz左右,随着距离的增大,速度振级逐渐减小,且高频振动衰减较低频快,在18.8 m坡顶处低频振动也出现了较大的衰减。下行列车引起的振动较上行列车大,主要体现在10~100 Hz的中高频段,在0~10 Hz的低频范围内,上下行列车引起的振动则较为接近。

在D2方向上,振动的主要频率分布在50 Hz左右,在8、16.3 m处速度振级相对于3.1 m处速度振级有明显的衰减,且低频振动衰减也较显著。与D1方向相同,上下行列车引起低频振动(1~10 Hz)较为一致,在10~100 Hz频率范围内,下行列车引起的振动更大。

对于D3方向,振动的主要频率分布在50 Hz左右,随着距离的增大,速度振级由两桥墩向中间逐渐减小,高频振动衰减速度比低频快。与其他距离测点不同的是,桥墩B附近处( $R=23.5$  m)下行列车引起的各频率振动均大于上行列车引起的振动,且靠近桥墩B处( $R=23.5$  m)的低频振动(1~10 Hz)大于其他距离位置。桥墩中间12.4 m处的振级较靠近桥墩AB的3.3和23.5 m处的振级有明显的衰减。

对比三个方向的1/3倍频程图,各方向的振动能量在不同频率区间分布较为一致,地面振动主要频率分布在50 Hz左右,不受地形的影响。下行列车引起振动较上行列车大主要体现在10~100 Hz的中高频段,上下行列车引起的1~10 Hz低频振动则较为一致。随着距离的增加,高频振动衰减速率较低频振动快,但D2方向的低频振动也出现了较大的衰减。

与文献[7]相比,在一定距离范围内,平原地形和山区地形条件下,振动能量在不同频率区间的分

布规律不受距离的影响,高频振动衰减均较低频快;但两种地形下振动优势频率不同,振动能量的分布规律也不同。

## 4 结 论

对重庆轻轨6号线通过典型斜坡及陡崖地形的高架段由列车运行引起的地面振动进行了现场测试,并对振动数据进行了振动速度级衰减以及1/3倍频程分析,得出以下结论:

(1)在一定距离范围内,不同距离处的振动能量在频率区间的分布一致,不受地形影响,但与平原地形相比,振动的优势频率并不相同,本试验中列车引起地面振动的主要频率分布在50 Hz左右。

(2)地表振动从桥墩承台传至周围土体中会出现较大的放大,且在与轨道中心线成45°方向上远轨下行列车引起的放大区域较近轨上行列车大。

(3)列车运行具有明显的偏载效应,近轨上行列车引起振动在承台上随距离呈增大趋势,而远轨下行列车引起振动则在承台上呈减小趋势。

(4)下行加速列车引起地面振动较减速且速度较低的上行列车大,主要体现在10~100 Hz高频部分,上、下行列车引起低频振动则较为一致。

(5)在山区地形和平原地形下,地表振动衰减均呈现出波动性,但振动放大区的位置各不相同,振动衰减快慢区域也不同。本试验中,在一定距离范围内,振动在45°方向衰减先快后慢,在12 m附近出现振动放大区;在斜坡方向衰减先慢后快,且在13 m附近出现振动放大区;振动沿小斜坡及陡崖衰减速度均慢于平面。

## 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[R]. 北京:中国城市轨道交通协会, 2018(4).  
China Urban Mass Transit Association. Urban mass transit 2017 annual statistics and analysis report [R]. Beijing: China Urban Mass Transit Association, 2018 (4). (in Chinese)

[2] 李小珍,刘全民,张迅,等. 高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 56-61.  
Li X Zh, Liu Q M, Zhang X, et al. Ground vibration induced by inter-city express train [J]. Journal of Vibra-

tion and Shock, 2014, 33(16):56-61. (in Chinese)

[3] 李小珍,张志俊,冉汶民,等. 桥上列车高速运行引起的地面振动试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 815-823.  
Li X Zh, Zhang Zh J, Ran W M, et al. Field test of ground vibration induced by high-speed train on elevated bridge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 815-823. (in Chinese)

[4] 罗忆,胡晶晶,杨宜谦,等. 重载列车通过高架桥诱发地面振动传播与衰减规律的现场测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增1):3523-3532.  
Luo Y, Hu J J, Yang Y Q, et al. Field monitoring of vibration response and attenuation induced by heavy freight trains on viaduct [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (Sup1): 3523-3532. (in Chinese)

[5] 高广运,何俊锋,李志毅,等. 列车运行引起的地面振动衰减分析[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1):74-78.  
Gao G Y, He J F, Li Zh Y, et al. Analysis on attenuation of ground vibration induced by moving train [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26 (1):74-78. (in Chinese)

[6] 动力机器基础设计规范: GB 50040—96[S]. 北京:中国计划出版社,1996.  
Code for design of dynamic machine foundation: GB 50040—96 [S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese)

[7] 陈建国,夏禾,姚锦宝. 高架轨道交通列车对周围环境振动影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 159-163.  
Chen J G, Xia H, Yao J B. Test for environment vibration induced by trains on viaduct [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2):159-163. (in Chinese)

[8] Ju S H, Lin H T. Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical rayleigh speeds by finite element method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(12): 993-1002.

[9] Madshus C, Kaynia A M. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed [J]. Journal of Sound & Vibration, 2000, 231 (3): 689-701.

[10] Zhai W, Wei K, Song X L, et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 72:24-36.

(本文责编:周小潭)

(下转第151页)