

# 地铁过渡段结构振动响应特性与噪声分析

谭佳<sup>1</sup> 许炜萍<sup>2</sup> 赵楚轩<sup>2</sup> 王呼佳<sup>3</sup> 杨朋<sup>3</sup> 孙克国<sup>2</sup>

(1. 广州地铁集团有限公司, 510220, 广州; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 610031, 成都; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 为研究地面过渡段地铁振动的响应特性,对广州市坑口地铁站前所处地面过渡段轨行区以及其临近地面进行振动以及噪声测试,对所得振动加速度进行傅里叶变换,分析了列车振动在横向上的传播规律以及列车振动的影响因素,得到了以下结论:列车制动行为、钢轨接头以及列车载重的增加会增强列车振动,而碎石道床可以有效减弱列车振动的传播;上、下行线列车经过时,其轨枕测点振动加速度峰值分别为 10.80 和 4.22  $\text{m/s}^2$ ,地面振动加速度峰值为 0.07  $\text{m/s}^2$ ,振动加速度在横向上的传播呈现逐渐衰减的趋势;列车振动引起下方轨枕最大频响在 110 Hz 左右,频响范围为 0 ~ 400 Hz;旁边轨道轨枕最大频响在 80 Hz 左右,频响范围为 0 ~ 200 Hz;地面最大频响在 50 Hz 左右,频响范围为 0 ~ 100 Hz;整体车致振动传播过程中高频成分衰减较大,到了地面低频响有所放大;列车运行致使振动噪声在地面临近轨道一侧噪声最大值为 95.5 dB,远离轨道建筑物楼底噪声最大值为 87.9 dB,超过规范噪声限制 75 dB,振动噪声在横向上有小幅度衰减。

**关键词** 过渡段; 地铁列车振动; 时域分析; 频响特性; 振动噪声

**中图分类号** U231.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.05.008

## Vibration Response Characteristics and Noise Analysis of Metro Transition Section Structure

TAN Jia, XU Weiping, ZHAO Chuxuan, WANG Hujia, YANG Peng, SUN Keguo

**Abstract** To study the response characteristics of metro vibration in the transition section, the vibration and noise are tested in the track area of the transition section in front of the station and the adjacent ground of Guangzhou Kengkou station. By conducting Fourier transform on the obtained vibration acceleration, the transverse propagation law of train vibration and the influencing factors of train vibration are analyzed. The following conclusions are obtained: train braking behavior, rail joint and increase of train load will enhance the train vibration, while gravel track bed can effectively reduce the train vibration

propagation; when the train is passing through the upper and lower lines, the peak vibration acceleration of the sleeper measuring point is 10.80 and 4.22  $\text{m/s}^2$  respectively, the ground vibration acceleration peak value being 0.07  $\text{m/s}^2$ , and the lateral propagation of the vibration acceleration presents a gradual attenuation trend. The maximum frequency response of the lower sleeper caused by train vibration is about 110 Hz, the frequency response range is mainly 0 ~ 400 Hz; the maximum frequency response of the side track sleeper is about 80 Hz, the frequency response range is 0 ~ 200 Hz; the maximum frequency response on the ground is about 50 Hz, the frequency range is 0 ~ 100 Hz. The high-frequency component of the whole train induced vibration propagation process is greatly attenuated, and the low frequency response is enlarged when it reaches the ground. The maximum noise value of the vibration noise on the side near the track is 95.5 dB, and the maximum value of the noise at the bottom of the building far away from the track is 87.9 dB, exceeding the specified noise limitation 75 dB. The vibration noise has a small amplitude attenuation in the transverse direction.

**Key words** transition section; metro train vibration; time-domain analysis; frequency response characteristics; vibration and noise

**First-author's address** Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510220, Guangzhou, China

当前,轨道交通发展迅速,地铁的修建能缓解城市的交通压力,促进城市的经济发展。在轨道交通发展的同时,也带来了环境安全问题。地铁列车振动引起的环境问题已经愈来愈引起全社会的关注。

国内外学者对地铁列车振动传播规律、产生机理,地铁振动对周边建筑物内人体舒适度影响等方面研究取得了一系列成果。马晓磊等<sup>[1]</sup>以天津市Z2地铁线一期为依托,对沿线建筑物振动影响做了分析。邹超等<sup>[2]</sup>针对广州地铁3号线某段咽喉区

直、曲线段列车运行引起的周围地面振动影响,分析了列车引起地面加速度在时、频域的规律。肖桂元等<sup>[3]</sup>对地铁列车所引起的与地铁合建建筑物结构环境振动响应进行了现场测试,从时域及频域角度分析了地铁列车引起合建建筑物结构环境振动特性。张晓春等<sup>[4]</sup>建立了基于模糊理论的建筑内人体舒适度烦恼模型,给出了地铁振动引起的烦恼率曲线,得到了地铁列车运行振动相对于人体舒适度的参数。何卫等<sup>[5]</sup>对地铁区间隧道进行了试车试验,得到了隧道内列车荷载振动特性。盛涛等<sup>[6]</sup>以上海市某地铁线路临近的居民建筑为例,分析了地铁引起的三向环境振动对室内舒适度的影响程度及主要影响因素。郑国琛等<sup>[7]</sup>建立了车轨垂向振动耦合和隧道-土体数值模型,研究了振源加速度并且对振动加速度进行了预测分析。陈艳明等<sup>[8]</sup>采用触发采集方式,分析了下沉式地铁车辆段咽喉区振源特性以及地铁振动沿盖板和不同层楼板传播规律。侯博文等<sup>[9]</sup>提出了适用于中国城市轨道交通地下车站运营期间站台噪声评价方法和指标与限值。袁扬等<sup>[10]</sup>通过实验室锤击激励试验与数值模拟试验,对不同的振源特性下隧道-地层-建筑物振动传播体系的传递特性进行研究。刘鹏辉等<sup>[11]</sup>通过对地铁隧道内普通整体道床、I型轨道减振器、弹性短轨枕、梯形轨枕、钢弹簧浮置板道床的现场振动测试,进行时、频域对比,了解各种减振措施在不同频率范围内的减振效果差异。宗刚等<sup>[12]</sup>选取上海某地铁沿线工程建设场地,先后开展了建设前自由场和建设后建筑一场地的振动实测,通过实测数据的时、频域分析,对比研究了建筑物对场地振动的影响规律。曾泽民等<sup>[13]</sup>基于广州地铁3号线厦落车辆段试车线列车运行诱发的振动实测,通过振动时域和频域分析,获得地铁车辆段试车线引发的地面振动以及临近建筑结构物振动传播规律。

相关学者在研究地铁振动影响时,针对地面过渡段这一较为特殊的结构形式的研究不够充分。地铁过渡轨行段由于处在裸露的地表,列车运行产生的振动噪声势必会对地面建筑造成一定的影响。基于此,本文依托广州坑口地铁站振动测试项目工程,对站前过渡段轨道以及临近地面进行振动加速度的测试,研究地面过渡段列车振动特性及其影响因素,分析结果可为同类工程提供现场实测案例。

## 1 工程概况

坑口地铁站位于广州市荔湾区花地大道中及龙溪大道的交汇处,是广州地铁1号线的中间站。该车站为双线地铁车站,列车进出站前有一段是地面过渡段,轨行区裸露于地表,其道床结构形式为碎石道床,车站现场图如图1所示,车站东侧30 m为居民住宅楼。



图1 坑口地铁站现场图

## 2 测点布置与安装

本次工作主要测试双线轨道轨枕以及地面处的振动,测试采用的设备为TST3828EN型动静态信号测试仪以及压电式加速度传感器。该仪器采样频率范围为1 Hz~1 kHz,测点布置位置依据居民反映振动较为明显的典型区域来进行划分,测点断面分3个测点,测点位置关系如图2和图3所示。

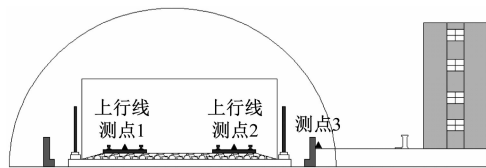


图2 振动加速度测点断面图

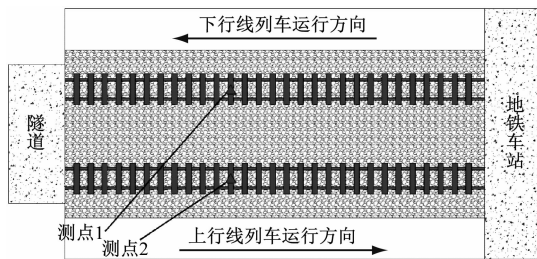


图3 轨行区测点平面图

其中,轨行区的测点为防止列车振动脱落需进行固定,且不能影响振动传播。故在安放振动传感器前,先用6101环氧树脂、水泥、细砂、乙二胺、二丁酯以1:1.6:3.2:0.1:0.12的质量比例制备环氧树

脂砂浆。此砂浆混合完成后为糊状,30 min 达到初凝,6 h 后达到峰值强度。为保证固定牢靠,先用抹布擦拭传感器底座,用快速粘连剂涂抹于底座表面以起到预粘效果;随后用制备好的环氧树脂砂浆均匀涂抹于底座四周,并按压填充空隙;最终凝固后,传感器底座与轨枕之间为硬连接,对于振动的传播影响很小。传感器固定现场图如图 4 和图 5 所示。



图 4 现场涂抹预粘剂图



图 5 传感器固定现场图

3 测试结果分析

通过对比坑口地铁站上下行列车运行的振动加速度结果,首先分析了上下行不同轨道之间的振动以及传输到地面的振动响应特性,然后对上下行轨道以及地面测点的振动加速度进行 1/3 倍频程分析,分析地面过渡段区间列车振动的响应及振动传播特性。

3.1 时域分析

测点 1、2、3 振动加速度时程曲线和幅值均值分别如图 6 ~ 图 9 以及表 1 所示。坑口站列车上下行进出站阶段实测运行速度分别为 25 和 45 m/s。

表 1 测点振动加速度记录				
				单位:m/s <sup>2</sup>
测点编号	上行幅值	上行均值	下行幅值	下行均值
测点 1	0.71	0.068	4.22	0.064
测点 2	10.80	0.184	0.26	0.007
测点 3	0.07	0.014	0.03	0.005

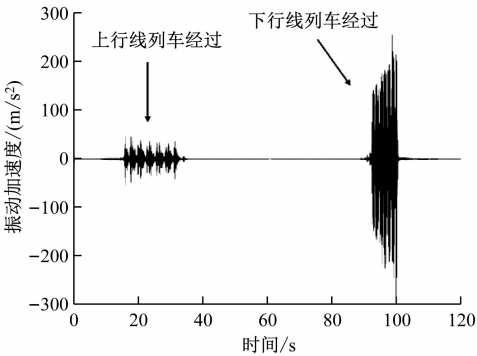


图 6 测点 1 振动加速度时程曲线

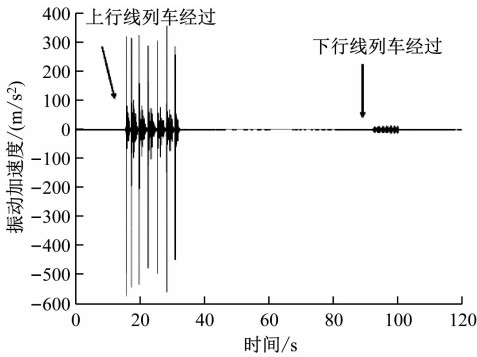


图 7 测点 2 振动加速度时程曲线

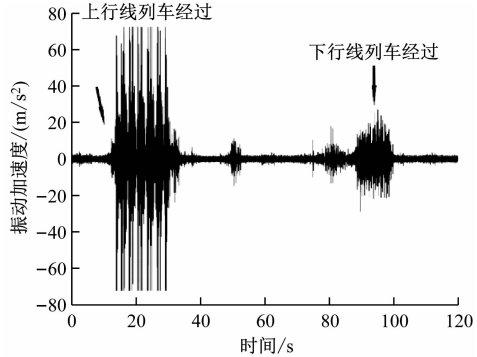


图 8 测点 3 振动加速度时程曲线

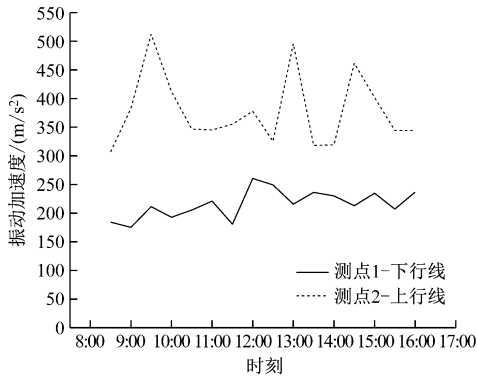


图 9 轨行区振动加速度幅值记录

图 6 ~ 图 8 为上下行列车经过时测点的振动加速度。当上行线列车经过时,测点 1 ~ 3 振动加速度峰值分别为 0.71 m/s<sup>2</sup>、10.80 m/s<sup>2</sup>、0.07 m/s<sup>2</sup>,下行线列车经过时,测点 1 ~ 3 振动加速度峰值分别

为  $4.22 \text{ m/s}^2$ 、 $0.26 \text{ m/s}^2$ 、 $0.03 \text{ m/s}^2$ 。从测点间的数据可以看出,振动在横向上的传播呈现逐渐衰减的趋势,其中,两条轨道峰值加速度差异较大,考虑主要原因为钢轨接头原因,测点 2 所处上行线钢轨接头较多,且列车进站减速过程与钢轨之间的摩擦增大。从振动持续时间上来看,上行线振动所持续的时间要比下行线长,上行线振动持续时间约为 15 s,下行线振动时间为 10 s。图 9 为轨行区振动加速度在测试时间内的幅值记录。从记录的幅值来看,上行线在 9:30、13:30、15:00 时刻存在峰值振动,下行线则是在 9:30、12:00、13:30、15:00、16:00 出现峰值振动,考虑峰值振动出现的主要原因是这些时段列车载重较大。故从整体时域分析结果来看,振动在横向上的传播呈现逐渐衰减的趋势,列车载重的增加,钢轨接头以及列车制动行为都会增强列车的振动,而以从振源中心传播至旁侧轨道以及地面的振动来看,碎石道床能够有效地减弱列车振动。

### 3.2 频域分析

时域内振动加速度幅值的统计分析结果仅仅能够反映出振动响应瞬时最大值的规律,线路结构在高速运行的列车激励下,其频率的构成是十分复杂的。为了对线路结构各个部位振动的频率成分进行研究,本文将得到的时程曲线进行傅里叶变换,得到了振动加速度频谱曲线。

根据 GB 10070—88《城市区域环境振动标准》,计算振动加速度级  $v_{\text{al}}$  为:

$$v_{\text{al}} = 20 \lg \left( \frac{a}{a_0} \right)$$

式中:

$a$ ——振动加速度有效值,  $\text{m/s}^2$ ;

$a_0$ ——基准加速度,取值为  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

上行线列车经过时的各测点振动频谱如图 10~图 12 所示,下行线列车经过时的各测点频谱如图 13~图 15 所示。

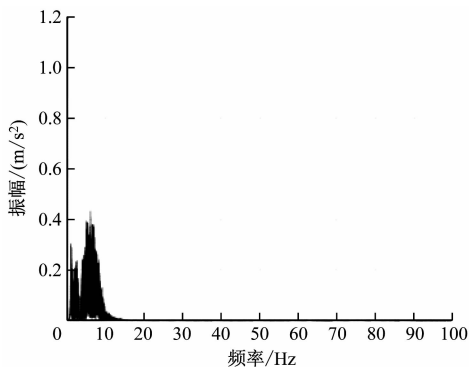


图 10 上行线测点 1 振动频谱图

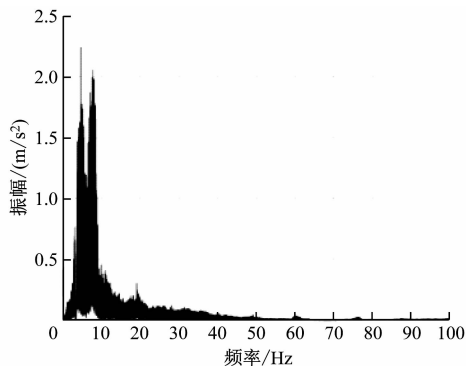


图 11 上行线测点 2 振动频谱图

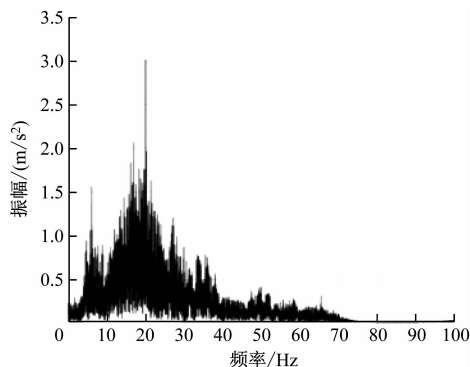


图 12 上行线测点 3 振动频谱图

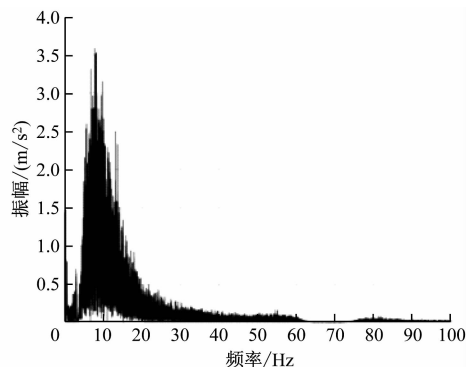


图 13 下行线测点 1 振动频谱图

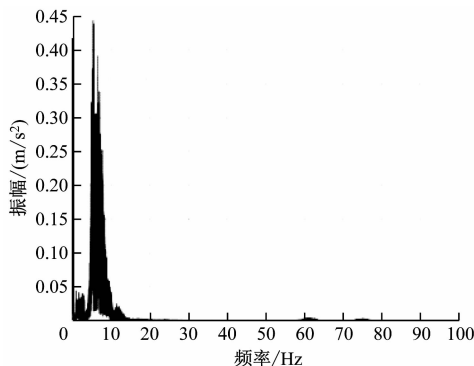


图 14 下行线测点 2 振动频谱图

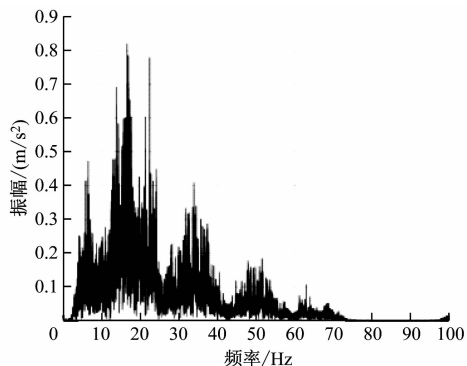


图15 下行线测点3 振动频谱图

图10~图15给出的是经傅里叶变换后的测点振动加速度频谱图。从图中可以看出:列车行驶在不同的轨道时,轨行区测点频响范围有较大差异,当列车行驶于上行线轨道时,上行线测点频响范围为0~400 Hz,最大频响在110 Hz左右;下行线测点频响范围是0~200 Hz,最大频响范围在80 Hz左右;而当列车行驶于下行线轨道时,下行线测点频响范围是0~400 Hz,最大频响在110 Hz左右;上行线测点频响范围是0~200 Hz,最大频响范围在80 Hz左右。地面测点频响范围不受上下行列车影响,频响范围是0~100 Hz,最大频响在50 Hz左右。可见列车振动致使的结构频响情况会在横向上呈现衰减趋势,在振动传播过程中,高频成分衰减较大。

#### 4 噪声测试结果分析与评价

本节重点分析早上5:30—7:00时段内采集的噪声数据。此时段车流行人等较少,采集的数据可以近似作为列车噪声影响。所用采集设备为噪声测试仪,该设备自带实时数据储存与分析功能,噪声测试测点布置以及现场工作图如图16和图17所示。



图16 噪声测点布置现场图

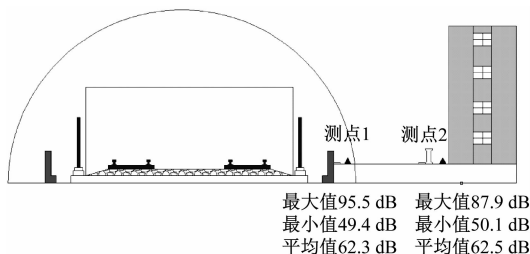


图17 噪声测点数值图

图17给出的是测试时间段内记录的噪声分贝值。从所记录的测点1、2的噪声值来看,可以明显看到列车经过时和静止时的噪声差异。其中,距离列车轨行区较近的测点1噪声最大值为95.5 dB,静止时为50.1 dB;测点2噪声最大值为87.9 dB,静止时为49.4 dB。噪声在横向上的传播有小幅度削减,符合实际情况。

将实际测得噪声值与《环境振动标准》中规定的各类区域噪声限制进行评价。坑口站附近建筑物按GB 10070—88《城市区域环境振动标准》的划分属于振动环境功能区4a类区域,昼间振动噪声限制为75 dB,靠近居民住宅的测点2振动噪声最大值为87.9 dB,超过规范规定限制,需要对列车振动采用一定的减振降噪措施。

#### 5 结论

1) 对比上下行列车经过对应测点时的振动加速度,上行列车经过时测点2振动加速度峰值为 $10.80 \text{ m/s}^2$ ,下行列车经过时,测点1的最大加速度为 $4.22 \text{ m/s}^2$ ,两者相差较大。推测是由于列车时速、钢轨接头、碎石道床对列车振动有大幅度的衰减。

2) 数据表明上行线列车经过时,测点1~3振动加速度峰值分别为 $0.71 \text{ m/s}^2$ 、 $10.80 \text{ m/s}^2$ 、 $0.07 \text{ m/s}^2$ ,下行线列车经过时,测点1~3振动加速度峰值分别为 $4.22 \text{ m/s}^2$ 、 $0.26 \text{ m/s}^2$ 、 $0.03 \text{ m/s}^2$ 。从测点间的数据可以看出,振动在横向上的传播呈现逐渐衰减的趋势。

3) 列车在不同轨道行驶引起的轨行区测点频响情况有所差异,当列车行驶于测点轨道时振动引起最大频响在110 Hz左右,频响范围为0~400 Hz;旁边轨道轨枕最大频响在80 Hz左右,频响影响范围为0~200 Hz;地面最大频响在50 Hz左右,频响影响范围为0~100 Hz;整体列车振动频响特性在横向上衰减,尤其是高频成分随着振动传播衰减明显。

4.2.2 施工完成后跟踪

为跟踪了解实际桥梁在二期恒载作用下的变形情况,2018 年 4 月 3 日利用铺轨前在主塔位置处预留的控制点,对轨道铺设完成后的梁面标高进行了实测,并与前期梁面标高进行对照,计算了桥梁变形量(见表 3)。桥梁变形趋势符合前期理论趋势,最大变形量为 78 mm,小于前期二期恒载作用下的最大理论变形值,符合预期,理论上可确保轨面平顺。经对实际轨面标高进行测量后,确认几何状态良好。

表 3 闵浦二桥轨面变形监测部分数据			
里程	沉降量/mm	里程	沉降量/mm
SK2 + 715.000	25	XK2 + 715.000	24
SK2 + 725.000	33	XK2 + 725.000	30
SK2 + 735.000	40	XK2 + 735.000	36
SK2 + 755.000	55	XK2 + 755.000	50
SK2 + 775.000	65	XK2 + 775.000	62
SK2 + 795.000	75	XK2 + 795.000	71
SK2 + 815.000	78	XK2 + 815.000	75

上海轨道交通 5 号线南延伸于 2018 年 12 月 30 日通车试运营,至今闵浦二桥段轨道状态良好。

5 结语

本文详述了上海轨道交通 5 号线南延伸闵浦二

(上接第 41 页)

4) 根据实时记录发现:距离列车轨行区较近地面测点噪声最大值为 95.5 dB,静止时为 50.1 dB;远离轨道一侧的测点噪声最大值为 87.9 dB,静止时为 49.4 dB,噪声最值超过规范限制 75 dB,需采取一定减噪措施。

参考文献

[1] 马晓磊,巴振宁,高愈辉,等.滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J].岩土工程学报,2019(增刊2):177.

[2] 邹超,汪益敏,汪朝晖,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.

[3] 肖桂元,韦红亮,王志驹,等.地铁列车引起与地铁合建建筑结构环境振动特性现场测试分析[J].铁道学报,2015(5):88.

[4] 张晓春,张辰辰,张磊,等.地铁列车振动对临近建筑内人体舒适度的影响研究[J].中国矿业大学学报,2009(6):835.

[5] 何卫,谢伟平,刘立胜.地铁隧道列车振动特性试验研究[J].

桥主桥段铺轨线形设计、铺轨工程实施方案和后续实施情况。通过本工程案例的经验,对采用特大跨度桥梁的轨道交通建设提出如下建议:① 轨道交通特大跨度桥梁,由于在二期恒载和活载作用下的变形较大,线路纵断面应考虑桥梁变形趋势结合桥跨布置进行设计。② 大跨度桥梁轨道铺设前应对梁面标高进行测量,并根据实测梁面标高、桥梁设计变形、桥面预拱度等参数进行铺轨线形设计,确保桥梁在二期恒载和活载作用下变形后轨面的平顺性。③ 铺轨施工过程中,轨面标高应按轨面与梁面的相对高程进行控制,并应实时监测过程中高程变化情况,发生异常及时协调处理解决。

参考文献

[1] 上海市住房和城乡建设管理委员会.城市轨道交通工程技术规范:DG/TJ 08-2232—2017[S].上海:同济大学出版社,2017.

[2] 王进,高晓新,李文英,等.大跨度预应力结构地段的轨道设计与施工技术要求[J].铁道标准设计,2007(10):22.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[4] 邓卫博,张涛,李照星.城轨交通大跨度钢桁斜拉桥轨道工程监测技术研究[J].现代城市轨道交通,2017(5):25.

[5] 周虎利.公路城轨两用大跨度钢桁斜拉桥铺设无砟轨道关键技术[J].城市轨道交通研究,2012(3):71.

(收稿日期:2019-08-01)

华中科技大学学报(自然科学版),2016(4):85.

[6] 盛涛,张善莉,单伽钰,等.地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析[J].振动、测试与诊断,2015(2):352.

[7] 郑国琛,祁皓.福州地铁运行引起的环境振动加速度预测分析[J].工程力学,2015(增刊1):331.

[8] 陈艳明,冯青松,刘庆杰,等.下沉式地铁车辆段咽喉区车致振动特性[J].交通运输工程学报,2020(3):51.

[9] 侯博文,曾钦娥,费琳琳,等.城市轨道交通地下车站站台噪声评价方法[J].清华大学学报(自然科学版),2021(1):57.

[10] 袁扬,刘维宁,王文斌.地铁交通引起环境振动传递特性试验研究[J].铁道学报,2014(4):99.

[11] 刘鹏辉,杨宜谦,尹京.地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J].振动与冲击,2014(2):31.

[12] 宗刚,郑玉琴,任晓崧,等.建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析[J].工程力学,2018(增刊1):287.

[13] 曾泽民.地铁车辆段列车运行引发振动与噪声效应的现场试验研究[D].广州:华南理工大学,2015.

(收稿日期:2020-09-09)