

基于实测的地铁振动距离衰减预测参数修正方法^{*}

杨忠平¹ 邵明耀² 王冠群³ 侯 宏³ 蒋忙舟² 张瑞浩³

(1. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

3. 西北工业大学航海学院, 710072, 西安//第一作者, 高级工程师)

摘 要 根据 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》, 为提升振动环境影响评价的科学性, 以西安地铁 4 号线为例, 获得其由地铁运行产生的振动源强和振动环境影响实测值。在已运营地铁线路的区间隧道和地面布设监测点位, 根据经验公式对地铁运营产生的振动环境影响进行预测。基于振动环境影响实测值与预测值的对比分析结果, 通过回归分析获得地铁振动环境距离衰减预测的相关参数。研究结果表明: 当地质条件为冲积、洪积平原区的冲积地层, 线路条件为直线段整体道床与圆型隧道断面, 列车类型为 6 节编组 B 型车, 列车运行速度为 65 km/h 的工况条件下, 振动源强为 78.8 dB, 环境振动影响实测值比预测值小约 0.8~4.9 dB; 距外轨中心线 5~10 m 范围内, 振动环境影响实测衰减比预测衰减大约 4.3 dB; 由回归分析法获得的地铁振动距离衰减预测参数 $a=-6.458$ 、 $b=-0.074$ 、 $c=4.410$ 。

关键词 地铁; 振动距离衰减; 预测参数修正

中图分类号 U211.3; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.05.015

Correction Method for Metro Vibration Distance Attenuation Prediction Parameters Based on Field Measurement

YANG Zhongping, SHAO Mingyao, WANG Guanqun, HOU Hong, JIANG Mangzhou, ZHANG Ruihao

Abstract According to Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment—Urban Rail Transit (HJ 453—2018), to improve the scientific nature of vibration environmental impact assessment, the measured values of vibration source strength and vibration environmental impact caused by metro operation on Xi'an Metro Line 4 are obtained. Monitoring points are set in interval tunnel and on ground of the operating metro line, the vibration environmental impact caused by metro operation is predicted using empirical formula. Based on the comparative analysis results of the field measured and predicted values of vibration environmental impact, relevant pa-

rameters of metro vibration environment distance attenuation prediction are obtained by regression analysis. Research results show that in the geographical condition of alluvial stratum in alluvial or proluvial plain areas, when line conditions are linear monolithic track bed and circular tunnel section, train type is 6-carriage formation of B-type car with operating speed of 65 km/h, the vibration source strength is 78.8 dB, and the measured value of vibration environmental impact is about 0.8~4.9 dB lower than the predicted value; within 5~10 m range from the outer rail centerline, the measured attenuation of vibration environmental impact is about 4.3 dB higher than the predicted one; the prediction parameters a , b , and c of the metro vibration distance attenuation obtained by regression analysis are -6.458 , -0.074 , and 4.410 respectively.

Key words metro; vibration distance attenuation; prediction parameter correction

First-author's address Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI), 710043, Xi'an, China

目前, 由城市轨道交通地下线运营带来的环境振动问题逐渐凸显^[1-2]。地下线振动环境影响的研究方法主要采用数值模拟分析和现场测试^[3-4]。由于土层物理性质的离散性, 数值模拟方法通常需要简化模型, 另外由于数值模拟方法选取参数的不确定性, 会对数值计算结果产生较大的影响^[5]。随着试验设备和试验方法的不断进步, 现场测试已经成为一个重要的、不可替代的研究方法^[6]。HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》对振动源强的确定方法及振动环境影响的预测模式进行了改进, 并提倡通过类比测量的方法开展振动环境影响预测^[7]。此后, 已有研究人员对深圳、上海和青岛等部分城市的地下线振动源强和地面振动环境影响进行了实测分析^[8-9], 但这些文献的研究

^{*} 陕西省重点研发计划课题项目(2021ZDLGY02-03); 中铁第一勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划项目(院科 20-47)

内容没有将地铁运行产生的振动源强与振动环境影响联系起来统一研究,对地铁振动距离衰减的修正研究也较少。为提升振动环境影响评价的科学性,以西安地铁 4 号线(以下简称“4 号线”)为例,通过现场实测、经验公式预测和回归分析法获得了在一定工况条件下的地铁振动源强和振动距离衰减预测参数。本文研究可为类似工程项目提供借鉴与参考。

1 工程背景及监测方案

1.1 工程背景

4 号线全长 35.2 km,全部为地下线路,从北到南穿越冲积、冲洪积平原区和黄土塬区,列车采用 6 节编组 B 型列车,其设计速度目标值为 80 km/h,于 2018 年 12 月开始运营。4 号线减振措施的里程段落明晰,钢轨磨损程度小,平、纵断面设计资料完整。由于 4 号线大部分区段位于冲积、冲洪积平原区的冲积地层,其地质条件在西安地铁线网中具有代表性。

1.2 监测方案

1) 监测物理量。根据 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》,地铁运行的振动源强 $S_{VLz0,max}$ 为列车通过时段内区间隧道轨顶上方 1.0~1.5 m 处隧道壁的最大 Z 振级强弱值。地铁运行产生的振动环境影响 $S_{VLz,max}$ 为列车通过时段内,距外轨中心不同距离处地面测点的最大 Z 振级值。

2) 监测断面。选择未采取减振措施的断面作为振动环境影响距离衰减的监测断面;制定振动源强监测实施方案并报送地铁运营部门,向运营部门申请在区间隧道开展振动源强监测;调查隧道断面形式、里程标记、电源设置、线路情况和列车运行速度等信息。

3) 监测设备。监测设备主要为数据采集仪和加速度传感器:数据采集系统采用 B & K 公司 LAN-XI 系列的 3050-A 型数据采集仪,其输入频率范围为 0~51.2 kHz;试验采用 B & K 4513B 型、B & K 4533-B 型加速度传感器。

4) 监测点位。振动源强监测点位于区间隧道轨顶上方 1.35 m 处的隧道壁。在振动源强监测点的地面位置布设振动环境影响距离衰减监测断面,监测点位分别距外轨中心线 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 处。

2 振动源强及振动环境影响实测

2.1 振动源强

2.1.1 现场监测情况

在前一日列车运营结束后,由研究人员进入地铁区间隧道布设加速度传感器并接通电源,在校准无误后开启数据采集仪。在后一日列车运营结束后,由研究人员进入地铁区间隧道检查设备连接的完好性,将数据采集仪连接至电脑并获得振动源强全天的监测数据。单列列车通过时,其振动源强加速度典型时域图如图 1 所示。

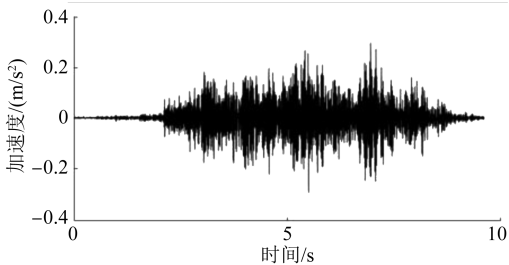


图 1 单列列车通过时的振动源强加速度典型时域图
Fig. 1 Typical time-domain diagram of vibration source strength while a single train passing

2.1.2 数据处理

截取每列列车经过时的时域数据并进行分段,每段数据经过滤波器和 Z 计权可以得到其对应的 Z 计权 1/3 倍频程谱,通过计算获得每段数据的 Z 振级,其最大值即为该列车通过时段的最大 Z 振级 ($S_{VLz0,max}$)。当日驶过的 20 列列车通过时段的 $S_{VLz0,max}$ 数据处理结果如表 1 所示。

表 1 20 列列车在通过时段的 $S_{VLz0,max}$ 数据处理结果
Tab. 1 Data processing results of $S_{VLz0,max}$ while 20 trains passing

序号	$S_{VLz0,max}$ dB	序号	$S_{VLz0,max}$ dB	序号	$S_{VLz0,max}$ dB	序号	$S_{VLz0,max}$ dB
1	83.4	6	81.1	11	78.5	16	77.2
2	76.8	7	79.2	12	77.5	17	75.4
3	77.5	8	77.2	13	86.7	18	76.3
4	75.6	9	81.6	14	77.2	19	75.4
5	87.4	10	74.8	15	79.0	20	78.7

2.1.3 振动源强实测值

单列列车的振动源强虽具有一定的离散性,但其振动主频集中在 63 Hz 附近。单列列车通过时,其振动源强 Z 计权振动加速度级典型频域如图 2 所示。以 20 列列车 $S_{VLz0,max}$ 算术平均值 78.8 dB 作为振动源强,地质条件为冲积、冲洪积平原区的冲积地层,线

路条件为直线段整体道床与圆型隧道断面,列车类型为 6 节编组 B 型车,列车运行速度为 65 km/h。

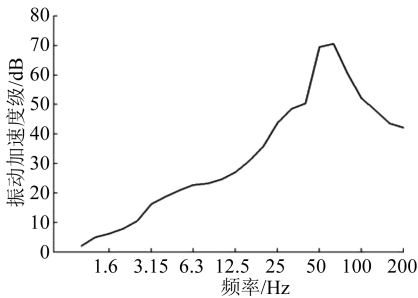


图 2 单列列车通过时的振动源强 Z 计权振动加速度级典型频域图

Fig. 2 Typical frequency-domain diagram of vibration source strength Z-weight vibration acceleration level while a single train passing

2.2 振动环境影响实测值

对振动距离衰减监测断面的 5 个测点同时进行测量,共采集了 22 组监测数据,取连续 20 组监测数据处理获得不同测点处的振动环境影响实测值,再求其算术平均值。通过计算获得距离外轨中心线 5 m、10 m、20 m、30 m 和 40 m 处的振动环境影响实测值分别为 71.5 dB、66.8 dB、65.8 dB、65.7 dB 和 65.0 dB。

3 振动环境影响预测及预测参数修正

3.1 振动环境影响预测

3.1.1 振动影响预测

地铁振动通过轨枕、道床传递至隧道壁,经过竖向和水平距离的衰减后传递至地面。振动影响预测值 S_z 可以表示为:

$$S_z = S_{VLz0, \max} + C_{\text{修正}} \quad (1)$$

式中:

$C_{\text{修正}}$ ——各种环境因素的修正值,主要包括车速修正、轨道承重修正、轨道类型修正、距离修正、建筑物结构修正和行车密度修正等。

地铁运行在轮轨界面处产生的振动通过轨道结构传递至隧道壁,隧道壁再向外由土壤经过距离衰减修正后传递至地面引起振动环境影响。振动源强是在一定车速、轨道和行车密度条件下进行实测的,引用实测的振动源强进行振动影响预测时已经考虑了车速、轨道条件、行车密度等修正项,因此只需考虑距离衰减修正。

3.1.2 距离衰减修正

距离衰减修正 $C_{\text{距离修正}}$ 是振动在隧道壁处向外

通过土壤在水平和竖向距离上的衰减,可以表示为:

$$C_{\text{距离修正}} = \gamma_{\text{竖向}} + \gamma_{\text{水平}} \quad (2)$$

$$\gamma_{\text{竖向}} = -8 \lg[\beta(H - 1.25)] \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{水平}} = a \lg r + br + c \quad (4)$$

式中:

$\gamma_{\text{竖向}}$ ——距离衰减修正的竖向距离衰减值,单位 dB;

$\gamma_{\text{水平}}$ ——距离衰减修正的水平距离衰减值,单位 dB;

H ——地下线轨顶至地面的垂直距离,单位 m;

β ——地铁隧道上方土层相关系数;

r ——预测点至外轨中心线的水平距离,单位 m;

a 、 b 、 c ——地铁振动距离衰减修正系数,本文取 $a = -3.28$ 、 $b = -0.20$ 、 $c = 3.09$ 。

根据 4 号线的设计及地勘资料可以获得其监测断面的 $H = 27.5$ m、 $\beta = 0.25$ 。由式(1)一式(4)计算可以得到,距外轨中心线 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 处的振动环境影响预测值分别为 72.3 dB、71.9 dB、70.7 dB、69.9 dB、68.8 dB。

3.2 实测值与预测值对比分析

振动环境影响实测值和预测值的数值大小及其衰减程度均有明显区别,因此有必要对其进行对比分析。振动影响实测值整体小于预测值约 0.8~4.9 dB;距外轨中心线 5~10 m 范围内,振动影响实测值衰减了 4.7 dB,而预测值仅衰减了 0.4 dB,两者相差 4.3 dB。

3.3 距离衰减预测参数回归分析

3.3.1 原始数据处理

根据振动能量叠加原理求取单列列车不同测点振动影响实测值的均方根,再将其进行算术平均后可以获得距外轨中心线不同距离测点处的平均振动加速度,如表 2 所示。

表 2 距外轨中心线不同距离测点处的平均振动加速度
Tab. 2 Average vibration acceleration of measuring points at different distance from the outer rail centerline

测点距外轨 中心线距离/m	实测平均振动 加速度/(m/s ²)	实测振动 加速度幅值比
5	0.017 2	1.000 0
10	0.013 4	0.779 1
20	0.012 4	0.720 9
30	0.011 9	0.691 9
40	0.010 3	0.598 8

3.3.2 一次拟合

将上述数据分别进行幂函数和指数函数的一次回归拟合,所获得的距外轨中心线不同距离测点处的振动加速度幅值比一次拟合函数图如图3所示。

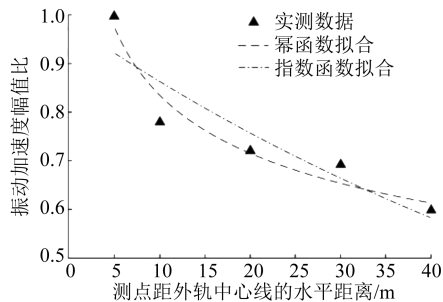


图3 距外轨中心线不同距离测点处的振动加速度幅值比一次拟合函数图

Fig. 3 Primary fitting function diagram of the vibration acceleration amplitude ratio of measuring points at different distance from the outer rail centerline

3.3.3 二次拟合

为了保证拟合出的参数的精确性,取距外轨中心线不同距离测点处幂函数曲线上的振动加速度幅值比和指数函数曲线上的振动加速度幅值比,分别与实测的振动加速度幅值比做差值,并根据其差值的绝对值进行二次拟合,所获得的距外轨中心线不同距离测点处的振动加速度幅值比二次拟合函数图如图4所示。

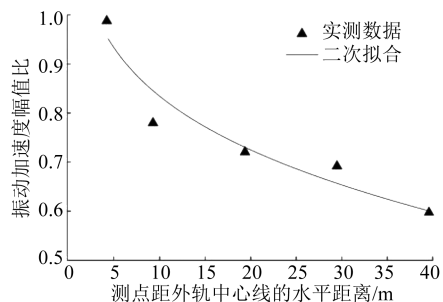


图4 距外轨中心线不同距离测点处的振动加速度幅值比二次拟合函数图

Fig. 4 Quadratic fitting function diagram of the vibration acceleration amplitude ratio of measuring points at different distance from the outer rail centerline

3.3.4 修正公式及验证

修正后的地铁振动水平距离衰减值可以表示为:

$$\gamma_{\text{水平}} = -6.458 \lg r - 0.074 r + 4.410 \quad (5)$$

距外轨中心线不同距离测点的振动环境影响实测值、预测值及修正后的预测值对比如图5所示。

由图5可知:相比于预测值与实测值的差值,修正后的预测值与实测值的差值由0.8~5.1 dB减小为-0.9~2.7 dB;在距外轨中心线20~40 m范围内,修正后的预测值与实测值的差值在1.0 dB以内,修正后的预测值更接近实际工况。

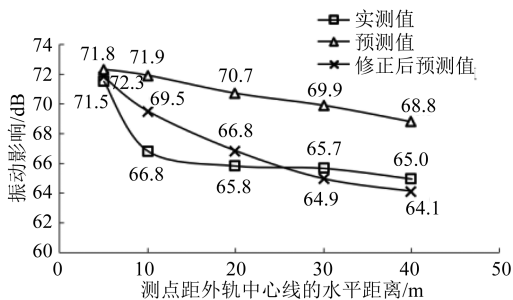


图5 距外轨中心线不同距离测点处的振动环境影响实测值、预测值及修正后的预测值对比

Fig. 5 Comparison diagram of the field measured, predicted and corrected values of vibration environmental impact on measuring points at different distance from the outer rail centerline

4 结语

本文以4号线为例,在其区间隧道和地面布设监测点位,以获得振动源强和振动环境影响实测值。将振动环境影响的实测值与经验公式预测值进行对比,并通过回归分析对地下线地铁振动距离衰减预测参数进行了修正。主要获得以下结论:

1) 在地质条件为冲击、冲洪积平原区的冲积地层,线路条件为直线段整体道床和圆型隧道断面,列车类型为B型车6辆编组,运行速度为65 km/h的工况条件下,振动源强为78.8 dB。

2) 振动环境影响实测值比预测值小约0.8~4.9 dB,距外轨中心线5~10 m范围内,振动环境影响实测衰减比预测衰减大约4.3 dB。

3) 对振动环境影响实测数据进行幂函数和指数函数一元回归拟合和二次回归拟合,获得的地铁振动距离衰减修正的参数分别为-6.458、-0.074和4.410,可将其用于类似工程项目的振动环境影响预测。

地铁振动影响实测值与预测值具有较为明显的区别,因此极有必要进行地铁振动源强及其影响的实测分析。在条件允许的情况下,加长采样时间和多采集数据可以确保实测数据的代表性。此外,对地铁振动距离衰减参数进行修正有助于提高振

动环境影响预测的科学性。

参考文献

- [1] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等.我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J].中国科学:技术科学,2016,46(6):547.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2016, 46(6): 547.
- [2] 胡月琪,刘倩,王铮,等.北京市地铁列车运行引起的建筑室内结构噪声污染特征与评价[J].环境工程技术学报,2017,7(5):606.
HU Yueqi, LIU Qian, WANG Zheng, et al. Characteristics and evaluation of building indoor ground-borne noise pollution induced by subway in Beijing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(5): 606.
- [3] 杨尚福.不同土体条件下地铁列车引起的环境振动及建筑物二次结构噪声分析[D].成都:西南交通大学,2019.
YANG Shangfu. Analysis of vibration caused by subway train operation and secondary noise of buildings under different soil conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [4] 刘卫丰,刘维宁,袁扬,等.地铁列车与道路车辆运行对环境的振动影响现场测试与分析[J].铁道学报,2013,35(5):80.
LIU Weifeng, LIU Weining, YUAN Yang, et al. In-situ measurements of and analysis on environmental effects of vibrations induced by passage of metro trains and vehicles on the road[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(5): 80.
- [5] 全博伟.成都地铁10号线振动预测方法研究[D].成都:西南交通大学,2019.
TONG Bowei. Study on environment vibration prediction meth-

od of Chengdu Metro Line 10[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

- [6] 巴振宁,高愈辉,梁建文,等.天津软土地区地铁运营沿线地面振动响应实测与建模分析[J].噪声与振动控制,2021,41(1):160.
BA Zhenning, GAO Yuhui, LIANG Jianwen, et al. Field test and finite element modeling of ground surface vibration caused by metro line operation[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 160.
- [7] 卢力,辜小安,杨宜谦,等.城市轨道交通环评导则重点修订内容探析[J].环境影响评价,2019,41(2):20.
LU Li, GU Xiaolan, YANG Yiqian, et al. Analysis on revision of the technical guideline for environmental impact assessment—urban rail transit[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(2): 20.
- [8] 高盟,高运昌,徐晓,等.青岛岩质地基地铁3号线与上海软土地基地铁10号线振动实测对比分析[J].地震工程学报,2020,42(2):468.
GAO Meng, GAO Yunchang, XU Xiao, et al. Comparative analysis of vibration measurement between Qingdao Metro Line 3 on rock foundation and Shanghai Metro Line 10 on soft foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 468.
- [9] 张凌,雷晓燕,刘全民,等.地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J].振动测试与诊断,2020,40(1):89.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, LIU Quanmin, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89.

(收稿日期:2022-05-24)

(上接第79页)

且在高频区域的振动下降速度远大于低频区域的振动下降速度,即橡胶浮置板轨道对长波长引起的低频振动的隔振效果并不显著。

参考文献

- [1] 温泽峰.钢轨波浪形磨损研究[D].成都:西南交通大学,2006.
WEN Zefeng. Study on rail corrugation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 李伟.地铁钢轨波磨成因及其对车辆/轨道行为的影响[D].成都:西南交通大学,2015.
LI Wei. Study on root cause of metro rail corrugation and its influence on behavior of vehicle-track system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

- [3] 尹镒,蔡成标,朱胜阳.高速铁路轨面粗糙度测量方法与分析[J].中国科学:技术科学,2018,48(9):950.
YIN Qiang, CAI Chengbiao, ZHU Shengyang. Measuring method and analysis of rail roughness in high-speed railway[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(9): 950.
- [4] GRASSIE S L. Rail corrugation: advances in measurement, understanding and treatment[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1224.
- [5] 朱胜阳,王建伟,蔡成标,等.应用动力吸振器的浮置板轨道低频振动控制特性的试验研究[J].铁道学报,2021,43(4):142.
ZHU Shengyang, WANG Jianwei, CAI Chengbiao, et al. Experimental study on low-frequency vibration control characteristics of floating slab track using dynamic vibration absorbers[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 142.

(收稿日期:2021-03-18)