

高铁对临近场地地面振动影响测试分析与评估方法

钱凤霞

中国艺术研究院, 北京

收稿日期: 2024年11月2日; 录用日期: 2024年12月2日; 发布日期: 2024年12月11日

摘要

选择深圳光明区广深港高铁沿线场地作为研究对象, 通过现场测试的方式对高架桥类高铁列车运行引起沿线场地的振动特性进行研究, 并结合相关标准对高铁运行引起的场地环境振动对人体舒适度、精密设备使用的影响进行总结并给出相应评估方法。研究结果对该场地规划建设, 防微振设计以及高铁列车运行引起的场地振动研究具有重要实践价值。

关键词

高速铁路, 场地振动, 振动测试, 评估方法

Test Analysis and Evaluation Method for the Influence of High-Speed Railway on Ground Vibration in Adjacent Sites

Fengxia Qian

Chinese National Academy of Arts, Beijing

Received: Nov. 2nd, 2024; accepted: Dec. 2nd, 2024; published: Dec. 11th, 2024

Abstract

Choosing the Shenzhen Guangming District along the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong high-speed railway as the research object. By way of field testing, this study analyzes the vibration characteristics caused by the viaduct-type high-speed train running, summarizes the impacts of environmental vibrations induced by high-speed rail operations on human comfort and the use of precision equipment

according to relevant standards, and provides corresponding evaluation methods. The research results are of great practical value to the site planning and construction, the design of anti-micro vibration, and the research on the site vibration caused by high-speed train operation.

Keywords

High-Speed Railway, Ground Vibration, Vibration Test, Evaluation Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速铁路的蓬勃发展带来优异的经济、社会效益，其在交通运输中的重要作用日益凸显。但与此同时高铁列车运行对环境也产生不良影响，造成的地面环境振动影响即为其中之一。列车运行引起的振动对沿线居民的生产生活环境、仪器仪表甚至建筑结构的正常使用产生影响[1][2]。国内对地下列车引起的环境振动预测多采用数值模拟和现场实测的方法。陈建国、夏禾等[3]对高架轨道交通列车运行引起的环境振动进行现场测试；高广运等[4]通过对铁路振动进行现场实测研究饱和地基上列车运行引起的地面振动；刘维宁等[5]采用深孔激振试验预测分析地铁列车振动环境影响；李昌[6]将周期性有限元-无限元模型扩展到分析曲线段地铁振动；戚柳飞等[7]结合实测结果分析了地铁车辆经过小半径曲线段不同轨道结构对地面振动影响；周颖等[8]对上海某地铁线附近地块开展现场振动实测。数值方法通常基于土层沿纵向均匀分布等简化假设，难以准确模拟土体动力学行为所有固有的复杂属性和不确定性，基于实测的振动数据可更为真实地反映环境振动特征。高铁列车运行引起的环境振动与列车车速、结构类型、地质条件、地面状况等多种因素有关，不同路段的振动情况亦有所区别，因此研究高铁列车运行引起的环境振动很难依靠经验做出判断，宜通过现场实地测试分析了解振动情况。本文针对深圳光明区广深港高铁沿线场地振动情况开展振动测试研究，为相关理论分析和工程应用提供理论依据和数据资料。广深港高铁测试区段如图1所示。



Figure 1. Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong high-speed railway
图 1. 广深港高铁

2. 振动测试

2.1. 测试场地概况

测试选取广深港高架铁路沿线场地，为避免其他振源干扰，选取某食品厂场区内部道路进行振动测试，测试场地高差接近，可认为处于同一水平面，道路为水泥地面，较为平实坚固。该位置远离道路交通等振源，测试时周边无明显干扰。

2.2. 仪器使用情况

振动测试采用 Kinemetrics 公司的 ETNA2 型加速度仪，其具有基于网络的监测功能，并配接 EpiSensor 加速度计，可广泛应用于振(震)动监测领域。加速度仪有三个通道，其最大量程范围可选 $\pm 1\text{ g}$ 、 $\pm 2\text{ g}$ 、 $\pm 4\text{ g}$ ，带宽为 DC-200 Hz，动态范围 155 dB+。此次试验选取 $\pm 1\text{ g}$ 的测试范围。

2.3. 测试方案

本次现场测试共布置 6 个测点，如图 2 所示，测线方向与高铁铁道方向垂直，同时采集三方向加速度数据，并规定 X 向与高铁铁道方向平行，Y 向与高铁铁道方向垂直，Z 向为竖向。自高铁东侧 40 m 开始，每间隔 40 m 布置一个测点，最远处测点距高铁线路 240 m [9]。此次测试采样频率为 200 Hz，各测点连续采样 1 小时，捕捉期间高铁运行引起的振动信号。加速度仪放置在道路上，经调平后，在支座处采用 502 胶水与路面固定。



Figure 2. Measuring point diagram
图 2. 测点示意图

3. 测试数据分析

3.1. 各测点振动数据特征

为对比高铁列车引起的振动在场地土内的衰减情况与加速度传递规律，对不同距离测点同一趟列车经过时的加速度时域数据进行对比。数据截取列车经过时段，从出现纺锤状波形开始，到纺锤状波形结束为止。图 3 为 6 个测点在同一列车经过时的动力响应。图 4 为各测点三方向加速度有效值对比。

根据加速度时域数据对比发现，水平向振动影响并不总是弱于竖向振动，此次测试在距高铁 120 m

范围内, 水平向振动才是主要振动形式, 这与我们的直观感受并不相同。而在距高速铁路 160 m~240 m 范围内, 竖向振动的影响开始大于水平向振动。且随着距高铁距离的增大, 振动水平整体呈衰减趋势, 仅 6 号点竖向振动稍有放大, 推测与距高铁距离较远、高铁振动影响有所衰减以及场地振动特性有关。

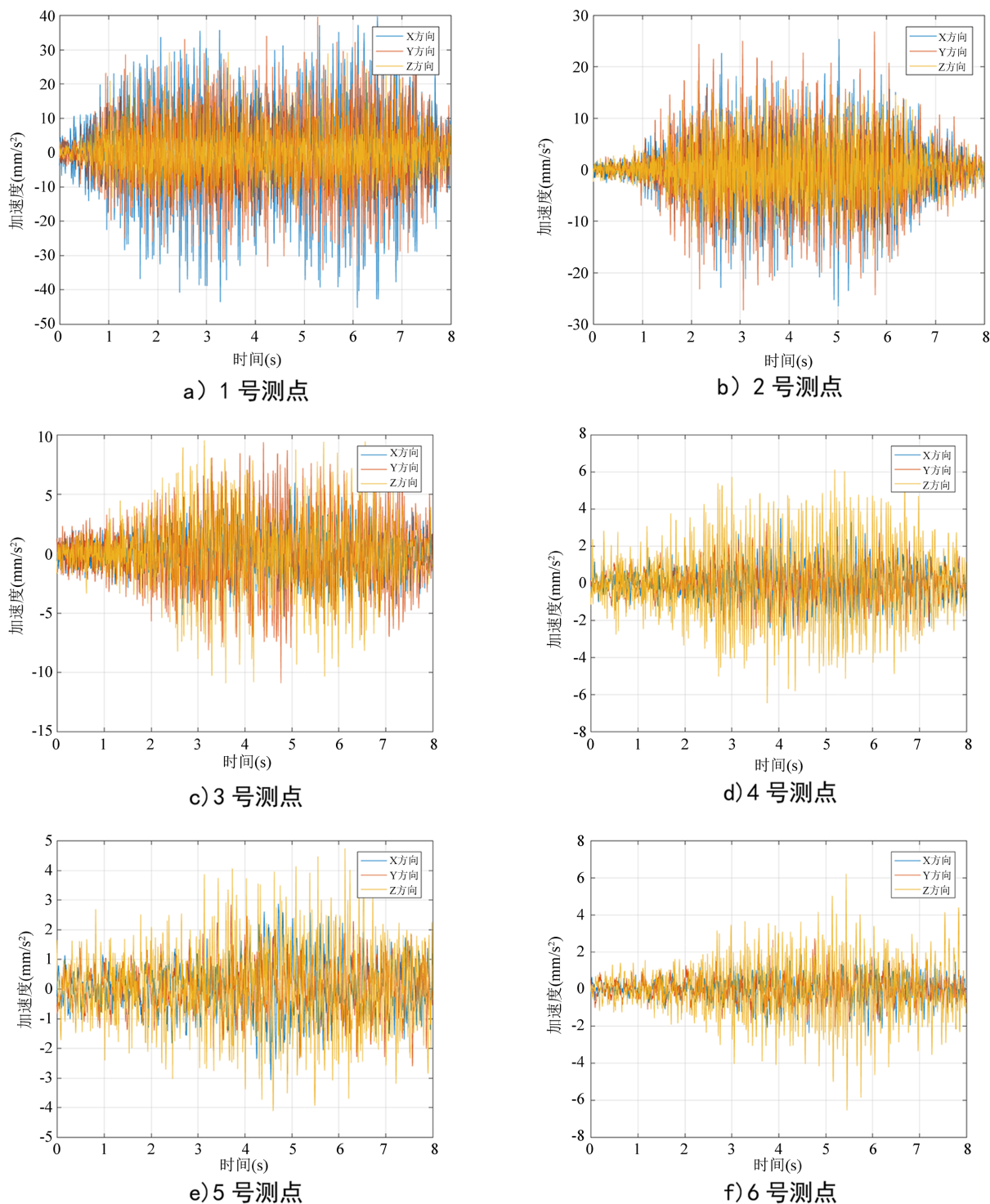


Figure 3. Time domain curve of acceleration at each measurement point

图 3. 各测点加速度时域曲线

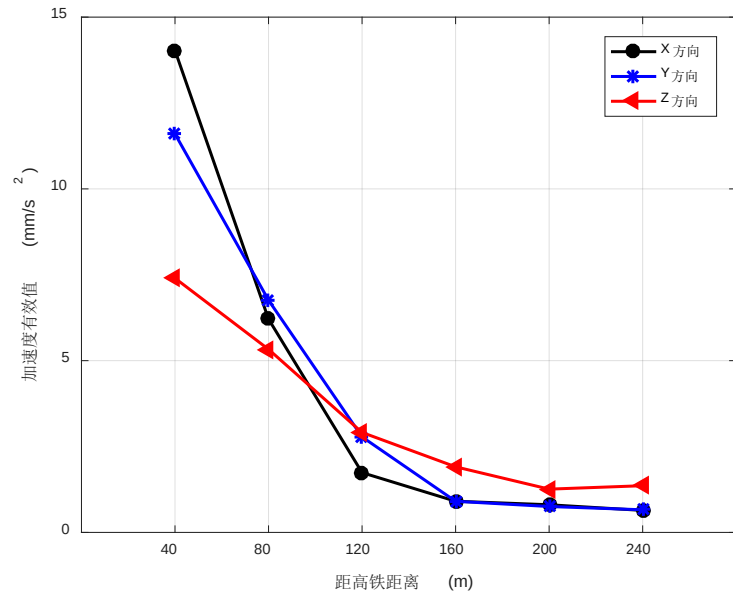
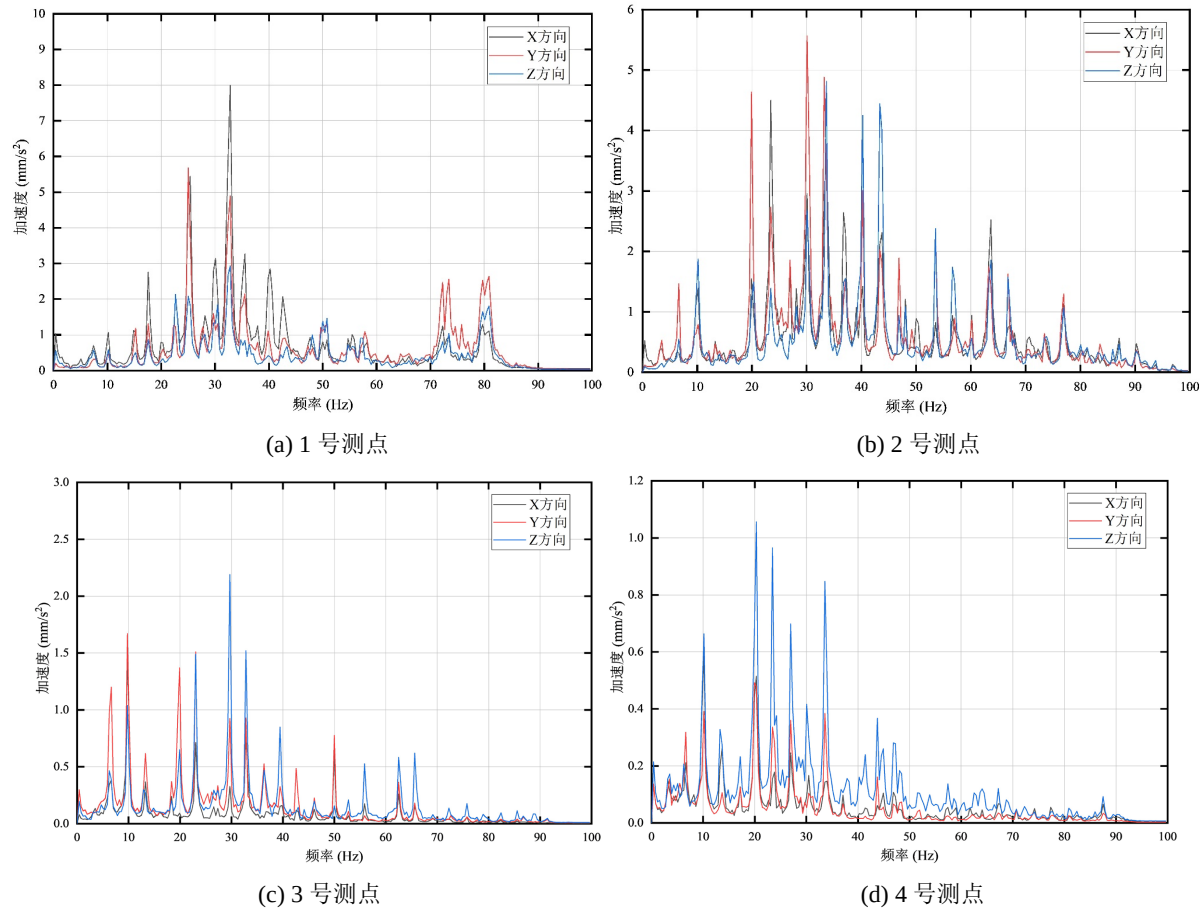


Figure 4. Comparison of effective values of acceleration
图 4. 加速度有效值对比

3.2. 频谱分析



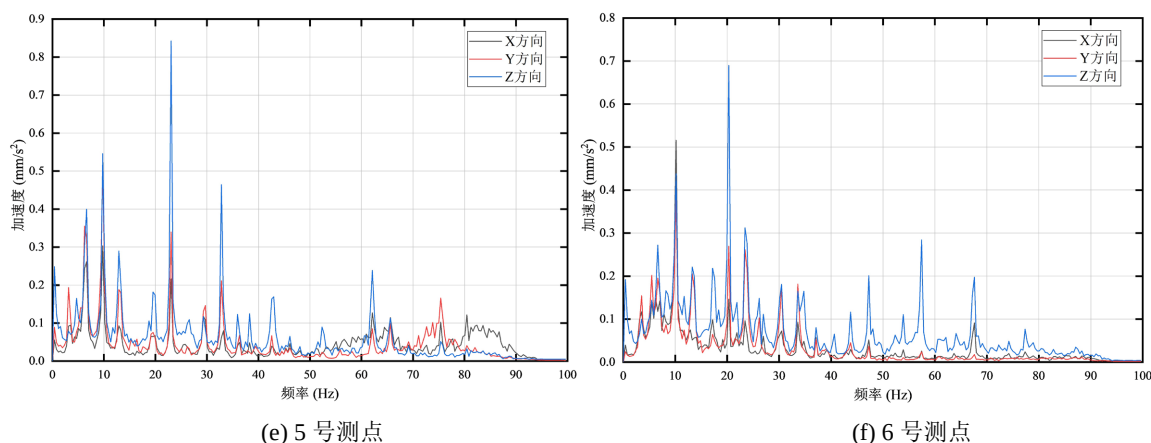


Figure 5. Acceleration curve in frequency domain of each measuring point
图 5. 各测点加速度频域曲线

对高铁列车经过时段场地振动进行快速傅里叶变换, 得到 6 个测点 3 方向振动加速度频谱。如图 5 所示。

根据频谱分析, 高铁列车引起的场地振动频带较宽, 主频在 3 Hz~70 Hz 之间, 在该范围内出现多个峰值, 频谱的能量分布较为离散。且对不同测点进行比较, 距高铁线路最近的测点, 振动能量相对较为集中, 振动频率在 20 Hz~40 Hz 的能量相对较大。随着距高铁线路距离的增加, 场地振动的主要频带向上下两端同时变宽, 而随着距离的继续增加, 低频振动能量占比逐渐增大, 说明在该场地环境下, 低频振动的能量传播较远。

4. 振动评估

高铁列车运行引起的场地振动对人体舒适度、仪器的正常使用甚至建筑结构的使用性和安全性均会产生影响。但现阶段对振动评估方法和振动限值做出明确规定的国家标准主要是对人体舒适度的影响, 对精密仪器的正常使用主要参考国际 VC 标准曲线, 为了评估高速铁路环境振动的影响, 本文从使用要求出发, 参考相应的评估标准给出其评估方法。

4.1. 高铁振动对人体舒适度影响的评估方法

交通环境振动对人体舒适度的影响是被广泛关注的领域, 此类问题的受众群体数量大, 社会反映强烈, 从该角度出发对列车运行引起的环境振动作出的规定较多。我国早在 1988 年便批准了《城市区域环境振动标准》[10], 并一直沿用至今, 其从人体舒适度的角度出发, 对城市区域铁路沿线建筑的振动水平做出了规定。该标准中以铅垂向 Z 振级作为振动的评价依据, 并在配套的《城市区域环境振动测量方法》[11]中规定了计算和测量方法。按 ISO2631/1—1985 [6]规定的全身振动 Z 计权因子修正后得到的振动加速度级即为 Z 振级, 测量中采用的时间计权常数为 1 s。对于铁路振动, 每个测点连续测量 20 次列车, 取每趟列车经过时段 1 s 内的 Z 振级最大值进行平均。其后颁布的行业标准《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标准》[7]中对建筑物室内振动及二次辐射噪声限值做出了规定, 并提出分频最大振动加速度级的评价指标, 考虑 1/3 倍频分析法, 用分布在 1/3 倍频段的 Z 计权加速度级作为振动限值。目前对高铁运行引起的振动对人体舒适性的影响, 使用较多的为上述两种评价方式, 即单一参数 Z 计权加速度级或 1/3 倍频程 Z 计权加速度级。本文采用 Z 计权加速度级进行评价, 标准限值参考《城市区域环境振动测量方法》中对居民文教区的振动要求 70 dB。一趟列车经过时 6 个测点的 Z

振级见图 6 所示, 最大 Z 振级对比关系见图 7 所示。

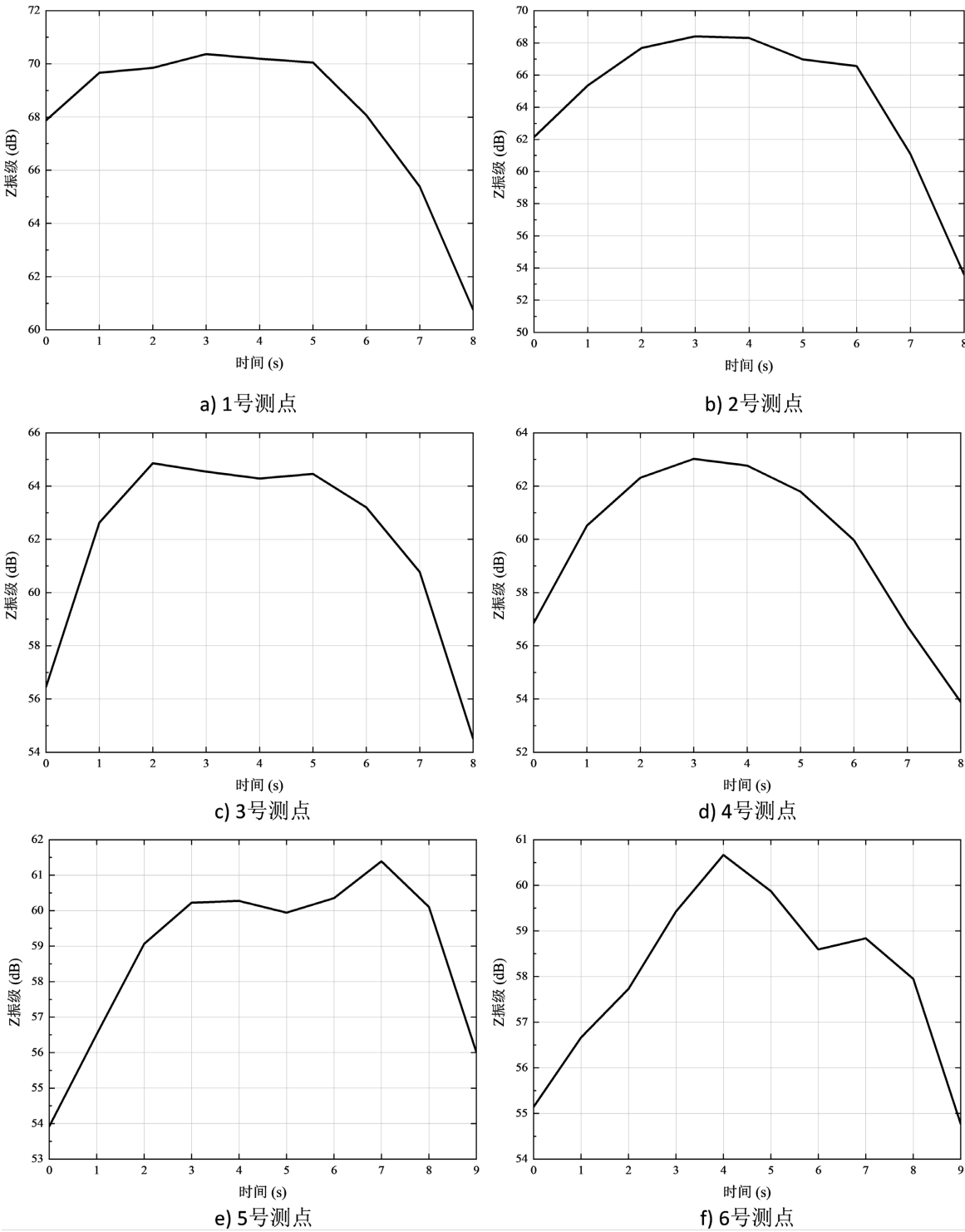


Figure 6. Z-level curve of each measuring point
图 6. 各测点 Z 振级曲线

根据 Z 振级曲线, 可以得知在高铁列车经过时段, 各测点 Z 振级曲线并不一致, 对应最大 Z 振级出

现的时刻也有差别,且并不是随距离向后推移。结合 3.2 中的频谱分析结果,高铁列车经过时段各测点振动主要频率并不相同,这不仅是场地振动特性和传递过程中衰减造成的,高铁列车经过时,不同时刻产生的振动频率也不相同。通过 Z 振级的衰减曲线可知,振动水平随距离的增加不断衰减,且随着距离的增加,120 m 后衰减趋势减缓,80~120 m 距离段振动衰减率较大。各测点铅垂向最大 Z 振级见表 1。

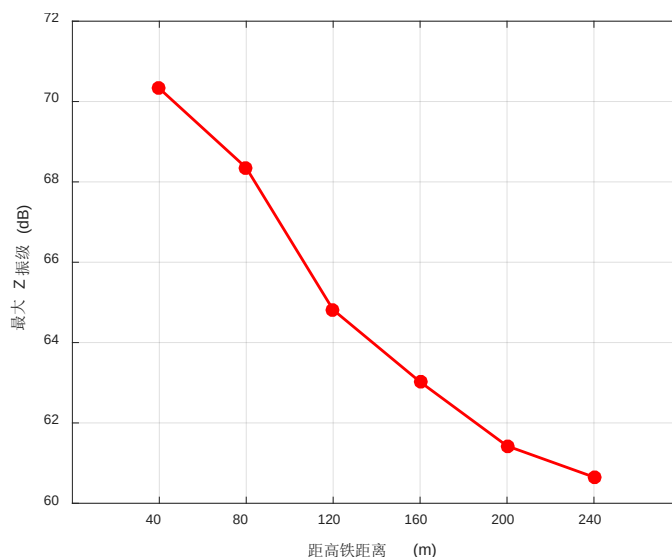


Figure 7. Maximum Z-level comparison curve

图 7. 最大 Z 振级对比曲线

Table 1. The maximum Z vibration level of vertical lead at each measuring point

表 1. 各测点铅垂向最大 Z 振级

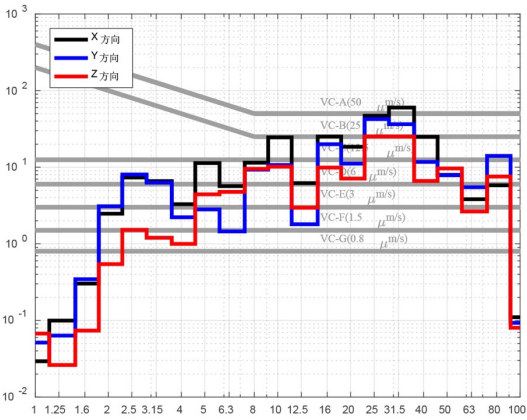
测点编号	距高铁距离(m)	最大 Z 振级(dB)	标准限值(dB)
1	40	70.32	70
2	80	68.35	70
3	120	64.81	70
4	160	63.02	70
5	200	61.42	70
6	240	60.65	70

由表 1 可知: 距离高铁线路的 1 号测点超出标准要求, 其他测点随距离增加 Z 振级不断减小, 均满足标准规定。

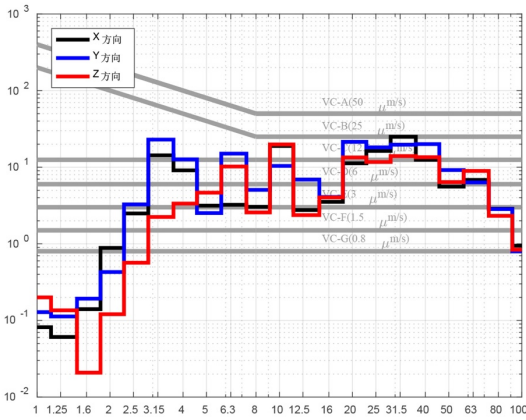
4.2. 高铁振动对精密仪器影响的评估方法

目前, 尚无针对高铁运行引起的振动对精密仪器使用影响的评估方法。针对精密仪器的使用条件, 常用的振动评价方法多是针对稳态环境振动做出要求, 高铁振动是随机过程, 与此有所区别。稳态环境下, 振动的波峰因数较低, 而高铁引起的振动是重复发生的随机振动, 具有较高的波峰因数。这种情况下高铁来临时的振动峰值将会对仪器设备正常使用产生主要影响。结合仪器的使用条件要求, 采用 VC 曲线评价标准作为评价指标[12]。VC 曲线是一种速度 1/3 倍频程有效值评价方法。本文对高铁经过时段每 2 秒内的数据进行速度 1/3 倍频程计算, 且设置 3/4 的重叠系数, 选出能量最大的时段, 采用 VC 曲线进行评价。该方法分析时长短, 牺牲了 1/3 倍频程低频部分的精度, 但高铁经过时段振动响应较大的区域以

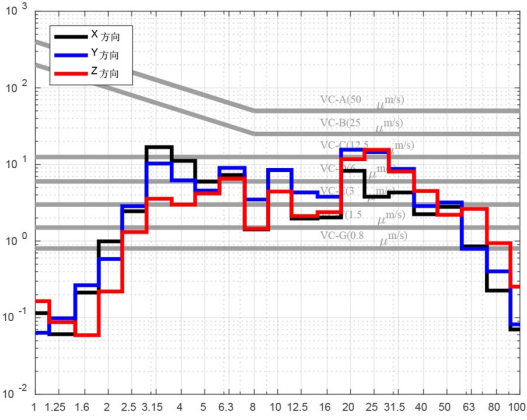
20 Hz~30 Hz 的较高频段振动为主,且能有效考虑能量最大部分振动的影响,保证较充裕的安全余量。各点 1/3 倍频程速度曲线如图 8 所示。



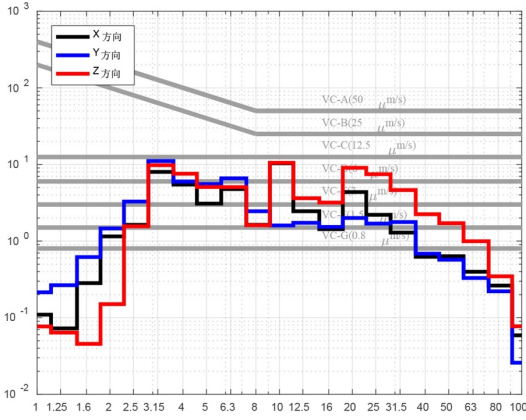
a) 1 号测点



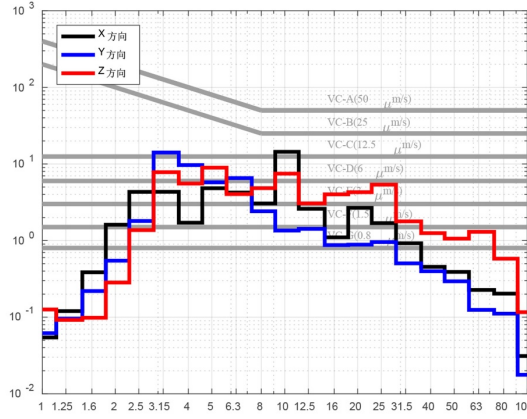
b) 2 号测点



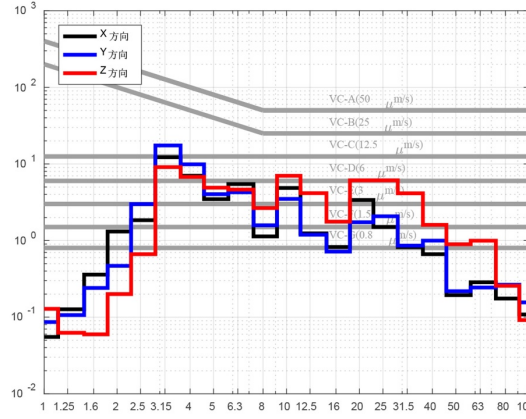
c) 3 号测点



d) 4 号测点



e) 5 号测点



f) 6 号测点

Figure 8. VC curve of each measurement point
图 8. 各测点 VC 曲线

根据 VC 曲线测试结果, 振动量级随距高铁线路距离呈衰减趋势, 特别是高频振动, 衰减迅速, 低频部分有所波动。距高铁最近的测点振动水平超过 VC-A, 其他测点均在 VC-B 以下, 4 号测点振动环境最好全频段均位于 VC-C 以下。

5. 结论

针对广深港高架铁路沿线场地的测试分析与评估可得到如下结论:

- 1) 高速铁路运行引起的环境振动, 水平向影响不可忽视, 某些情况下水平向响应甚至大于竖向。
- 2) 随着距离的增加, 高铁振动呈明显衰减态势, 根据场地土特性不同, 振动衰减程度亦不相同, 其中高频振动衰减较为迅速, 低频振动传播较远。
- 3) 高铁引起的场地振动频率范围较宽, 主要分布在 3 Hz~70 Hz 之间。峰值频率主要出现在 20 Hz~40 Hz 之间。
- 4) 不同的评价指标与计算方法对振动评价影响较大, 需从实际振动控制需求出发, 选取合理的评价手段与计算方法对振动影响进行评估。

参考文献

- [1] Connolly, D.P., Kouroussis, G., Woodward, P.K., AlvesCosta, P., Verlinden, O. and Forde, M.C. (2019) Field Testing and Analysis of High Speed Rail Vibrations. *Engineer Structures*, **186**, 536-552.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.08.013>
- [2] Connolly, D., Giannopoulos, A. and Forde, M.C. (2013) Numerical Modelling of Ground Borne Vibrations from High Speed Rail Lines on Embankment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **46**, 13-19.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.12.003>
- [3] 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.
- [4] 高广运, 何俊锋, 李志毅, 等. 饱和地基上列车运行引起的地面振动特性分析[J]. 振动工程学报, 2010, 23(2): 179-187.
- [5] 刘维宁, 陈嘉梁, 吴宗臻, 等. 地铁列车振动环境影响的深孔激振实测传递函数预测方法[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 82-89.
- [6] 李昌. 曲线隧道内地铁列车运行引起的地表振动传播规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [7] 戚柳飞, 王安斌, 谢莹松, 等. 地铁车辆经过不同轨道结构时对地面振动的影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(6): 147-152.
- [8] 周颖, 张君秋, 马开强, 等. 地铁致地面振动舒适度评价与放大区振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 24-33.
- [9] 黄伟, 张同亿, 胡明祎, 等. 某医院动力设备引起建筑结构振动传递测试研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(S2): 341-344.
- [10] 国家环境保护局. GB10070-1988 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [11] 国家环境保护局. GB/T10071-1988 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [12] Jaswal, H. (2007) Analysis of Micro-Vibration in Buildings. *Proceedings of the 2007 Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers*, Seattle, 8-12 August 2007, 1-12.