

列车通过城市轨道交通高架桥对地面振动影响研究

唐吉意¹, 林平²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101)

摘要: 为探究列车通过城市轨道交通高架桥时地面的振动特性及振动传递特性, 以某一城市轨道交通高架桥为研究对象, 对距离桥墩不同距离处同时进行振动测试, 对结果进行频域特性分析, 然后采用线性计权及Z计权进行1/3倍频程特性分析, 并分析了分别采用这两种计权方式时, 特征频率下振动的传递特性, 最后进行了等效连续Z振级传递特性分析。结果表明: 列车通过城市轨道交通高架桥时, 地面的振动加速度主要分布在0~200 Hz频率范围内, 且振动加速度峰值主要分布在60~80 Hz频率范围内; 在线性计权下, 地面的振动加速度级全局峰值均出现在频率63 Hz处, 局部峰值均出现在频率为4 Hz处; 在Z计权下, 地面的振动加速度级全局峰值均出现在50~63 Hz范围内, 局部峰值均出现在频率为4 Hz处; 振动由桥墩底部沿地面传递过程中, 随着与轨道中心线距离的增加, 地面振动加速度级不断减小, 且衰减速度随距轨道中心线距离的增大而减小。

关键词: 高架桥; 试验研究; 地面振动; 振动加速度级; 1/3倍频程; 振动传递

中图法分类号: U239.5

文献标识码: A

Study on influence of ground vibration when train passing through urban rail transit viaduct

TANG Jiyi¹, LIN Ping²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Ningbo Rail Transportation Group Co., Ltd., Ningbo, 315101, China)

Abstract: In order to explore the vibration characteristics and vibration transmission characteristics when the train passing through the viaduct of urban rail transit, taking an urban rail transit viaduct as the research object, the vibration test is carried out at different distances from the pier. The test results are analyzed in frequency domain. Then, the 1/3 octave are analyzed by using linear weighting and Z weighting, and the transmission characteristics of vibration under characteristic frequency are analyzed when two weights are adopted respectively. Finally, the transmission characteristics of equivalent continuous Z vibration level are analyzed. The results show that when the train passes through the urban rail transit viaduct, the vibration acceleration of the ground is mainly distributed in the 0~200Hz frequency range, and the peak value of vibration acceleration is mainly distributed in the frequency range of 60~80Hz. Under the linear weighting, the global peak of the vibration acceleration level of the ground appears at the frequency of 63Hz, and the local peak appears at the frequency of 4Hz. Under the Z weighting, the global peak value of the vibration acceleration level of the ground appears in the range of 50~63Hz, and the local peak values appear at the frequency of 4Hz. With the increase of the distance from the center line of the track, the acceleration level of the ground vibration decreases with the increase of the distance from the center of the pier to the ground, and the attenuation rate decreases with the increase of the distance from the center line of the track.

Key words: viaduct; experimental study; ground vibration; vibration acceleration level; 1/3 octave; vibration transmission

近年来,全国越来越多的城市在大力发展城市轨道交通^[1-5]。人们在享受城市轨道交通所带来的便捷的同时,城市轨道交通对沿线区域的振动与噪声问题,一直是人们重点关注与研究的两大难题^[6-17]。其中,城市轨道交通高架桥对沿线区域的振动影响作用,主要通过地面及地下两条路径进行振动传递,为了解城市轨道交通高架桥对沿线区域地面的振动影响及振动传递,本文以某城市轨道交通高架桥为例,通过对其桥梁跨中截面的地面振动进行测试及分析,旨在为城市轨道交通高架桥的地面振动特性及振动传递研究提供一定参考,且对沿线区域的减振设计也具有一定指导作用。

1 试验设计

该城市轨道交通高架桥采用 30 m 双线简支箱型梁,单柱整体式桥墩,桩基础,无缝线路。试验采用实际运营的城市轨道交通 B 型车,6 辆编组,转向架中心距 12.6 m,转向架轴距 2.3 m,带司机室拖车长 19.65 m,动车长 19 m,宽 2.89 m,接触网供电。

选取桥梁跨中截面进行测试,测点布置示意图如图 1 所示,布置的 4 个振动测点中,测点 Z1 位

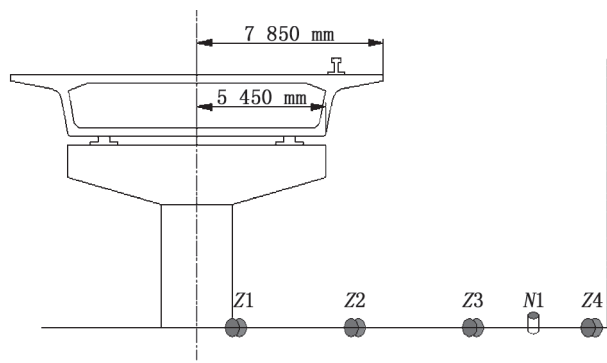


图 1 测点布置示意图

Fig.1 Layout of measuring points

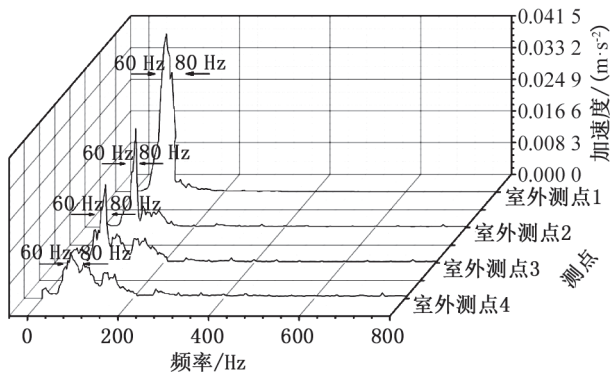


图 2 振动加速度频域图

Fig.2 Frequency spectrum of vibration acceleration

于桥墩底部,向远离桥梁中心线一侧依次布置测点 Z2—Z4,每相邻两个测点之间的距离为 6 m。每个测点同时布置垂向和横向传感器,以确保获取真实有效的振动加速度峰值和频率特征传递规律。

测试仪器采用东华压阻式加速度传感器(0~250 Hz),秦皇岛朗斯压电式加速度传感器(50、100、500 g),东方所振动噪声采集仪,笔记本电脑,为防止信号干扰,使用了屏蔽信号线。试验过程中,避免人为走动及其他振动对测量信号的干扰。列车经过时,进行振动数据采集,每通过一列车次,采集 1 组数据。为减小测试误差,采集多组数据,并进行有效数据筛选,对有效数据进行分析。

2 频域特性分析

对列车通过时测点振动加速度信号进行频域特性分析,如图 2 所示。由图 2 可知,4 个测点的振动加速度主要分布在 0~200 Hz 频率范围内;4 个测点的振动加速度在 60~80 Hz 频率范围内均达到峰值;振动从测点 Z1 到测点 Z4 的传递过程中,振动加速度逐渐减小,测点 Z4 到测点 Z3 的衰减幅度最大;随着距轨道中心线距离的增大,振动加速度的衰减速度逐渐降低。

3 1/3 倍频程特性分析

3.1 线性计权

线性计权下各测点的 1/3 倍频程中心频率的振动加速度级中,4 个测点的振动加速度级全局峰值均出现在频率为 63 Hz 处,测点 Z1—Z4 的全局峰值分别为 89.38、82.69、77.21、74.08 dB(表 1)。

图 3 为线性计权下各测点的 1/3 倍频程振动加速度曲线图。由图 3 可知,在 2~4 Hz 范围内,测点 Z1—Z4 的振动加速度级随频率的增大而增大,在频率为 4 Hz 处,振动加速度级取得局部峰值,测点 Z1—Z4 的局部峰值分别为 51.76、49.14、47.30、41.55 dB;在 63~200 Hz 范围内,测点 Z1—Z4 的振动加速度级随频率的增大而减小。

对测点 Z1 及 Z2,在 4~12.5 Hz 范围内,测点 Z1 及 Z2 的振动加速度级随频率的增大而减小,在频率为 12.5 Hz 处,振动加速度级取得极小值,分别为 43.68、41.87 dB;在 12.5~63 Hz 范围内,测点 Z1 及 Z2 的振动加速度级随频率的增大而增大,在

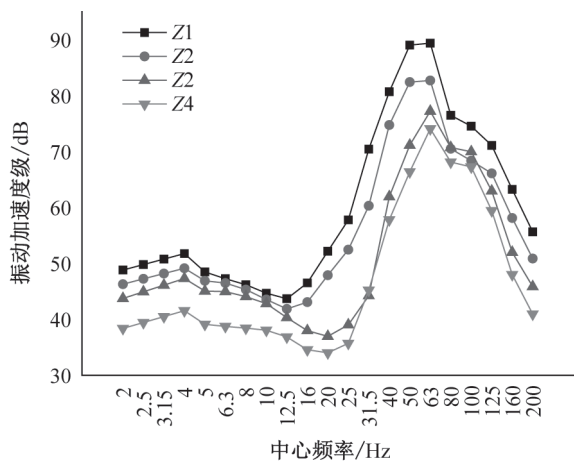


图 3 1/3 倍频程振动加速度曲线图（线性计权）
Fig.3 1/3 octave vibration acceleration curve (linear weighting)

表 1 1/3 倍频程中心频率的振动加速度级（线性计权）
Tab.1 Vibration acceleration level of 1/3 octave center frequency (linear weighting) （单位：dB）

中心频率 /Hz	Z1	Z2	Z3	Z4
2	48.82	46.28	43.73	38.37
2.5	49.80	47.24	44.92	39.43
3.15	50.78	48.19	46.11	40.49
4	51.76	49.14	47.30	41.55
5	48.48	46.89	45.06	39.11
6.3	47.26	46.50	44.96	38.73
8	46.18	45.32	44.06	38.43
10	44.68	43.55	42.82	38.05
12.5	43.68	41.87	40.30	36.84
16	46.51	43.08	37.99	34.57
20	52.17	47.89	36.97	34.01
25	57.77	52.45	39.01	35.72
31.5	70.43	60.30	44.23	45.20
40	80.67	74.74	61.92	57.79
50	89.02	82.41	71.14	66.37
63	89.38	82.69	77.21	74.08
80	76.47	70.50	70.72	68.12
100	74.52	68.36	69.96	67.25
125	71.10	66.09	62.94	59.44
160	63.22	58.12	51.98	48.00
200	55.65	50.87	45.85	40.94

频率为 63 Hz 处，振动加速度级取得全局峰值。

对测点 Z3 及 Z4，在 4~20 Hz 范围内，测点 Z3 及 Z4 的振动加速度级随频率的增大而减小，在频率为 20 Hz 处，振动加速度级取得极小值，分别为 36.97、34.01 dB；在 20~63 Hz 范围内，测点 Z3 及 Z4 的振动加速度级随频率的增大而增大，在频率为 63 Hz 处，振动加速度级取得全局峰值。

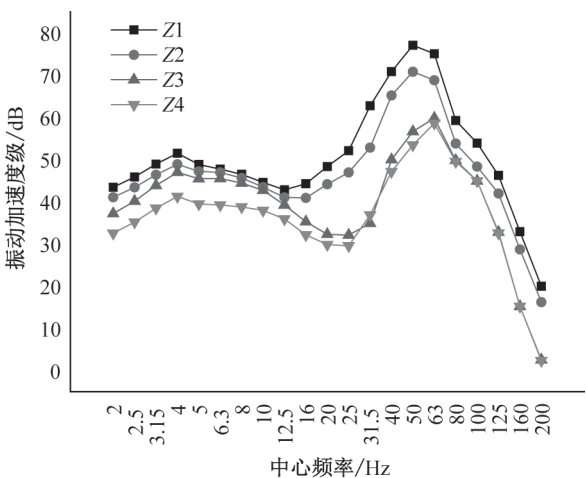


图 4 1/3 倍频程振动加速度曲线图（Z 计权）
Fig.4 1/3 octave vibration acceleration curve (Z weighting)

表 2 1/3 倍频程中心频率的振动加速度级（Z 计权）
Tab.2 Vibration acceleration level of 1/3 octave center frequency (Z weighting) （单位：dB）

中心频率 /Hz	Z1	Z2	Z3	Z4
2	43.43	41.05	37.19	32.55
2.5	45.87	43.42	40.14	35.18
3.15	48.91	46.38	43.85	38.48
4	51.47	48.86	46.95	41.25
5	48.81	47.20	45.45	39.46
6.3	47.71	46.94	45.50	39.22
8	46.49	45.62	44.43	38.76
10	44.58	43.45	42.70	37.94
12.5	42.81	41.02	39.24	35.90
16	44.27	40.91	35.27	32.16
20	48.32	44.14	32.29	29.84
25	52.08	46.93	32.11	29.57
31.5	62.72	52.81	34.88	36.87
40	70.81	65.17	49.96	47.14
50	77.06	70.80	56.63	53.45
63	75.05	68.78	59.82	58.60
80	59.25	53.78	49.82	49.51
100	53.89	48.33	44.93	44.95
125	46.24	41.95	32.77	32.56
160	32.91	28.69	15.19	15.23
200	19.98	16.22	2.55	2.37

3.2 Z 计权

Z 计权下各测点的 1/3 倍频程中心频率的振动加速度级中，4 个测点的振动加速度级全局峰值均出现在 50~63 Hz 范围内，测点 Z1—Z4 的全局峰值分别为 77.06、70.80、59.82、58.60 dB(表 2)。

图 4 为 Z 计权下各测点的 1/3 倍频程振动加速度曲线图。由图 4 可知，在 2~4 Hz 范围内，测点

Z1—Z4 的振动加速度级随频率的增大而增大,在频率为 4 Hz 处,振动加速度级取得局部峰值,测点 Z1—Z4 的局部峰值分别为 51.47、48.86、46.95、41.25 dB;在 63~200 Hz 范围内,测点 Z1—Z4 的振动加速度级随频率的增大而减小。

对测点 Z1 及 Z2,在 4~12.5 Hz 范围内,测点 Z1 及 Z2 的振动加速度级随频率的增大而减小,在频率为 12.5 Hz 处,振动加速度级取得极小值,分别为 42.81、41.02 dB;在 12.5~63 Hz 范围内,测点 Z1 及 Z2 的振动加速度级随频率的增大而增大,在频率为 63 Hz 处,振动加速度级取得全局峰值。

对测点 Z3 及 Z4,在 4~25 Hz 范围内,测点 Z3 及 Z4 的振动加速度级随频率的增大而减小,在频率为 25 Hz 处,振动加速度级取得极小值,分别为 32.11、29.57 dB;在 25~63 Hz 范围内,测点 Z3 及 Z4 的振动加速度级随频率的增大而增大,在频率为 63 Hz 处,振动加速度级取得全局峰值。

4 振动传递特性分析

特征频率下振动传递特性(线性计权,中心频率为 63 Hz)如图 5 所示,由图可知,振动从测点 Z1 到测点 Z4 的传递过程中,振动加速度级逐渐减小,测点 Z4 到测点 Z3 的衰减幅度最大;随着距离的增大,振动加速度级的衰减速度逐渐降低。

特征频率下振动传递特性(Z 计权,中心频率为 50 Hz 及 63 Hz)如图 6 所示,由图可知,振动从测点 Z1 到测点 Z4 的传递过程中,振动加速度级逐渐减小,测点 Z3 到测点 Z2 的衰减幅度最大;随着距离的增大,振动加速度级的衰减速度先增大后减小。

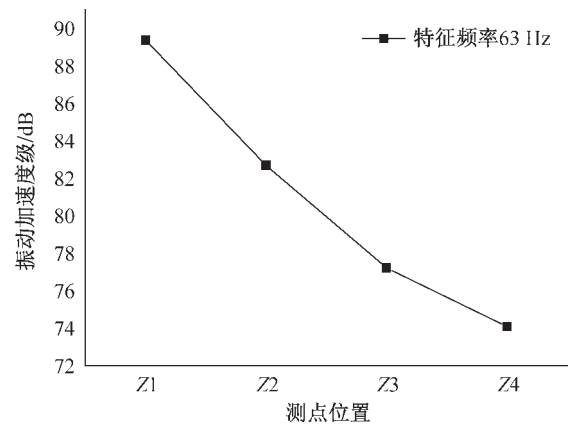


图 5 特征频率下振动传递特性(线性计权)
Fig.5 Characteristic of vibration transmission under characteristic frequency (linear weighting)

等效连续 Z 振级传递特性见图 7,由图可知,振动从测点 Z1 到 Z4 的传递过程中,等效连续 Z 振级逐渐减小,测点 Z4 到 Z3 的衰减幅度与测点 Z3 到 Z2 的衰减幅度大致相等,而测点 Z2 到 Z1 的衰减幅度明显变小,说明随着距离的增大,等效连续 Z 振级的衰减速度先保持稳定再逐渐降低。

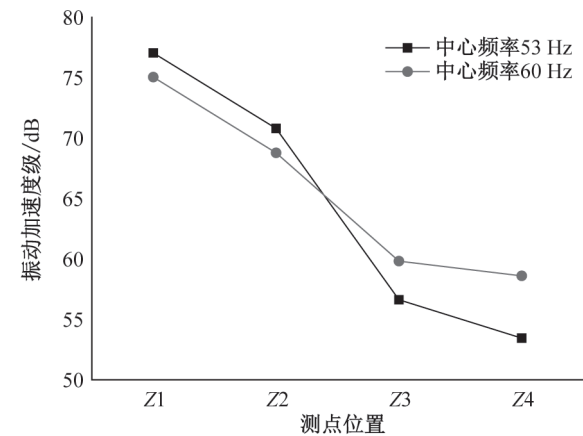


图 6 特征频率下振动传递特性(Z 计权)
Fig.6 Characteristic of vibration transmission under characteristic frequency (Z weighting)

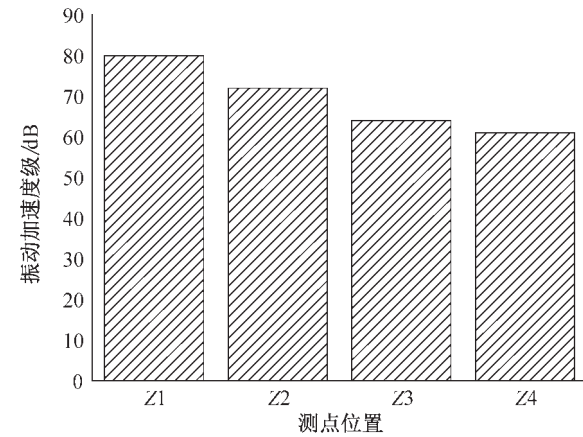


图 7 等效连续 Z 振级传递特性
Fig.7 Transmission characteristics of equivalent continuous Z vibration level

表 3 不同车次列车通过时振动加速度级(线性计权)
Tab.3 Vibration acceleration level when different trains passing through (linear weighting) (单位: dB)

车次	Z1	Z2	Z3	Z4
1	90.82	86.95	80.73	77.44
2	94.73	86.30	81.34	77.91
3	91.62	85.26	80.75	77.24
4	93.28	87.02	80.15	77.64
5	93.29	85.66	80.36	74.39
6	92.12	84.38	81.13	75.65
平均值	92.65	85.93	80.74	76.71

表 4 不同车次列车通过时振动加速度级 (Z 计权)
Tab.4 Vibration acceleration level when different trains
passing through (Z weighting) (单位: dB)

车次	Z1	Z2	Z3	Z4
1	72.71	67.33	62.94	59.41
2	76.13	71.50	61.99	59.49
3	90.67	84.78	70.60	68.44
4	92.35	85.53	70.07	68.80
5	73.73	66.81	61.47	56.39
6	73.42	65.11	61.71	57.65
平均值	79.84	73.51	64.80	61.70

标准 JGJ/T170-2009^[18] 中规定,城市轨道交通沿线区域的振动分析频率为 4~200 Hz,基于此,表 3 列举了不同车次通过时在线性计权下 4~200 Hz 范围内各测点的振动加速度级总极值,表 4 列举了不同车次通过时在 Z 计权下 4~200 Hz 范围内各测点的振动加速度级总极值。由表 3、表 4 也可以看出,在线性计权和 Z 计权下,振动加速度级均呈现由 Z1 至 Z4 逐渐减小的趋势。

5 结论

- 1) 列车经过城市轨道交通高架桥时,地面的振动加速度主要分布在 0~200 Hz 频率范围内,且振动加速度峰值主要分布在 60~80 Hz 频率范围内。
- 2) 列车经过城市轨道交通高架桥时,在线性计权下,地面的振动加速度级全局峰值均出现在频率 63 Hz 处,局部峰值均出现在频率 4 Hz 处;在 Z 计权下,地面的振动加速度级全局峰值均出现在 50~63 Hz 范围内,局部峰值均出现在频率 4 Hz 处。
- 3) 列车经过城市轨道交通高架桥时,振动由桥墩底部沿地面传递过程中,随着距离轨道中心线距离的增大,地面振动加速度级不断减小,且衰减速度随着与轨道中心线距离的增大而减小。

参考文献:

[1] 沈璐,王恒友.城市地铁项目建设对沿线住宅价格的影响研究——以西安市地铁 2 号线为例[J].河北工程大学学报:社会科学版,2009,26(4):19-21.
[2] 顾岷.我国城市轨道交通发展现状与展望[J].中国铁路,2011(10):53-56.
[3] 余凌曲,张建森.轨道交通对低碳城市建设的作用[J].开放导报,2009(5):26-30.
[4] 张晓莉,林茂德.论城市轨道交通建设对经济发展的

拉动作用[J].城市轨道交通研究,2009,12(1):1-6.
[5] 马超群,王玉萍,陈宽民.城市轨道交通效益的产生与作用机理分析[J].铁道运输与经济,2006(7):10-12.
[6] THOMPSON D J.Railway Noise and Vibration-Mechanisms, Modeling and Means of Control [M]. Oxford: Elsevier Ltd, 2009: 359.
[7] DAVID THOMPSON.Sound and vibration of rail transit[M]. Southampton: Southampton University Press, 2008: 50-320.
[8] 唐吉意,林平.宁波地铁 1 号线高架桥近远场噪声辐射研究[J].机械设计与制造工程,2017,46(8):114-118.
[9] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives[J]. Encyclopedia of Environmental Health, 2011(2): 240-253.
[10] 唐吉意,罗雁云,林平.地铁高架桥上部结构及整体道床振动特性研究[J].河南科学,2017,35(7):1090-1095.
[11] HECKL M, WETTSCHURECK R, Hauck G. Structure-borne sound and vibration from rail traffic [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 175-184.
[12] 彭华,高亮,张鸿儒.城市轨道交通的振动和噪声及其控制的研究[J].中国安全科学学报,2003(4):77-80.
[13] LEE Y Y, NAI K W, NG C F. The local vibration modes due to impact on the edge of a viaduct[J]. Applied Acoustics, 2004, 65(11): 1077-1093.
[14] 唐吉意,林平,罗雁云.城市轨道交通对建筑物室内噪声辐射试验研究[J].青岛理工大学学报,2017,38(4):95-101.
[15] SCHULTE-WERNING B, BEIER M, DEGEN K G, et al. Research on noise and vibration reduction at DB to improve the environmental friendliness of railway traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5): 1058-1069.
[16] 罗雁云,唐吉意,林平.地铁高架箱型梁正下方噪声辐射特性试验分析[J].四川环境,2017,36(3):101-105.
[17] AUGUSZTINOVICZ F, MÁRKI F, CARELS P, et al. Noise and vibration control of the south railway bridge of budapest[J]. Fla.st.u.l.rev, 2011, 62(5): 437-451.
[18] 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标准[S].

(责任编辑 王利君)