Research on the Classification Standard of Building Environmental Vibration Impact on the Test Line of Urban Subway Depot

Si-Yu Sun[1], Hong-Liang Liu[2], Xue-Liang Chen[1,*]

[1] *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

[2] *Science of science, Shanghai institute of Technology, Shanghai 201418, China.*

[*] *Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com*

ABSTRACT

With the acceleration of urbanization and the continuous growth of urban population, China's rail transit industry has developed rapidly, and by the end of 2023, 59 cities in China have operated urban rail transit with a total length of about 11,232.65 kilometers. On the other hand, the developable land resources in the central urban areas of China's large cities are almost exhausted, and the development of land resources around urban rail transit lines and depots has become the focus of attention of the government and real estate developers. In view of the vibration problem caused by train operation, this paper conducts an in-depth and systematic study on 12 completed subway depot test line construction projects according to the factors such as track type, vibration and noise reduction measures, superstructure building type, number of building floors, vibration detection and analysis methods. The results show that most of the subway superstructure buildings do not need to be measured or simulated because the track structure has energy dissipation and vibration reduction measures. Partially cover the subway superstructure with higher train speed, because more efficient energy and vibration reduction measures are installed, neither actual measurement nor simulation analysis is required; A small number of subway superstructures with too high train speed need to be simulated and analyzed to implement vibration control for vibration sensitive points. Structural engineers can adopt different simplification design methods for different types of subway covers, so as to save time and effort.

Keywords: *subway cover, vibration, noise, depot.*

城市地铁车辆段试车线上盖建筑环境振动影响分类标准研究

孙思宇[1]，刘红梁[2]，陈学良[1,*]

[1] *中国地震局地球物理研究所，北京 100081*

[2] *上海应用技术大学，上海 201418*

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_25

*通讯作者.chenxueliang007@126.com

摘要

随着城市化进程的加快与城市人口的不断增长，我国的轨道交通事业得到飞速发展，到 2023 年年末，我国有 59 个城市运营了总长约 11232.65 公里的城市轨道交通。另一方面，我国大城市中心城区的土地可开发资源几近枯竭，围绕城市轨道交通线路和车辆段的土地资源开发成了政府和房产商的关注焦点。针对列车运行引起的振动问题，本文对 12 个已经建成的地铁车辆段试车线上盖建筑项目，按照轨道类型、减振降噪措施、上盖建筑类型、建筑层数、振动检测和分析方法等因素开展了深入系统的研究。研究表明：大多数地铁上盖建筑，因为轨道结构有消能减振措施，因此既不需要实测，也不需要进行仿真分析；部分盖下列车车速较高的地铁上盖建筑，因为设置更高效的消能减振措施，既不需要实测，也不需要进行仿真分析；少数盖下列车车速过高的地铁上盖建筑，需要对该上盖建筑进行仿真分析，针对振动敏感点实施振动控制。结构工程师对不同类型的地铁上盖，可采用不同简化程度的设计方法，做到省时省力。

关键词：*地铁上盖,振动,噪声,车辆段.*

1.引言

随着城市化进程的加快与城市人口的不断增长，轨道交通因其低污染、高运载能力及便捷性，已经成为缓解城市交通拥堵的关键解决方案。到 2023 年年末，全国有 59 个城市运营了总长约 11232.65 公里的城市轨道线路[1]。城市地铁的车辆段，作为地铁列车的停放与管理核心地带，承担了停车、检修和综合维护等功能。由于车辆段占地广泛，建筑密度低，上方空间未充分利用，各城市纷纷启动地铁车辆段上盖项目以提高城市土地资源利用率。

车辆段上盖建筑环境振动影响评价方法主要分为现场实测法以及建模分析法，以这两种方法进行上盖建筑结构设计时存在一定弊端，我国目前只能参照现行的结构设计标准设计地铁车辆段上盖建筑结构。这种现状导致结构设计师生硬地套用现行规范，设计出来的结构无法满足经济和技术先进的要求。

本文根据我国已建车辆段试车线上盖建筑的具体情况，按照不同的轨道类型、上盖建筑类型、结构类型、上盖建筑对应车辆段区域、减振降噪措施、振动指标与规范对照情况等，通过统计分析的方法，提出了地铁上盖建筑环境振动影响分类方法，按照该方法，结构工程师可以根据地铁上盖建筑的具体情况，分门别类地选择最合理、最经济、最科学的设计方法。

2.现有评价方法存在的问题

（1）现场实测法。地铁振动现场实测的方法虽然其准确性、可靠性、针对性都非常可观，但由于此方法存在滞后性，它使用前提是地铁上盖建筑已经修成，当实测结果不满足标准限值要求的时候，再在结构物上另加减振措施会比较麻烦，也不美观，无法实现建筑结构一体化设计的要求。

（2）建模分析法。有限元建模分析可以做到振动预测，可以在上盖建筑修建之前获得其振动响应，根据模拟结果优化设计方案，广泛适用于各类建筑。但建模分析的一大缺陷就是它的计算量比较大。这就意味着更高额的成本，此外，建模分析对工程师要求也比较高，不同的工程师针对同一建筑的模拟结果也不尽相同，所以建模分析的准确性是有待验证的。

3.地铁车辆段试车线上盖建筑环项目统计

本文搜索到 12 个车辆段试车线地铁上盖建筑物项目，将这些项目针对车辆段区域、车站类型、上盖建筑类型、结构类型、轨道类型、减振降噪措施做了分类统计，并对这些项目的实测振动情况、建模分析情况、是否超出规范限值做深入的对比分析和研究，

具体统计情况如表 1~4 所示，其中项目号是对应的。

表 1 上盖建筑环境振动信息统计

项目号	地铁车辆段上盖项目	车辆段区域	上盖建筑类型	上盖建筑层数	现场实测法	建模分析法	对应参考文献
1	杭州某地铁车辆段上盖	试车线	住宅	8	√	√	[2]
2	杭州某地铁车辆段上盖	试车线	住宅	10	√	√	[3]
3	宁波地铁天童庄车辆段上盖	试车线	住宅	11		√	[4]
4	深圳某地铁车辆段上盖	试车线	住宅	14	√		[5]
5	广州典型地铁车辆段上盖	试车线	/	14	√		[6]
6	广州市某地铁车辆段上盖	试车线	住宅	18		√	[7]
7	深圳市前海湾车辆段上盖	试车线	住宅	26	√		[8]
8	深圳某地铁车辆段上盖	试车线	住宅	28	√		[9]
9	广州萝岗地铁车辆段上盖物业上盖	试车线	住宅	30		√	[10]
10	广州地铁 3 号线厦滘车辆段临近建筑	试车线	厂房	3	√		[11]
11	广州典型地铁车辆段上盖	试车线	厂房	3	√	√	[6]
12	横岗车辆段上盖	试车线	住宅	13	√		[8]

表 2 试车线上盖建筑轨道类型及减振降噪措施统计

项目号	轨道类型	减振降噪措施
1	有砟预应力混凝土轨枕	设置道床隔振垫
2	有砟预应力混凝土轨枕	设置道床隔振垫
3	有砟预应力混凝土轨枕	设置道床隔振垫和粗砂隔振沟
4	整体道床	在除整体道床及车挡范围外铺设卡梭贝格道床垫，在整体道床地段铺设 CK-02 型扣件轨下高弹垫板及铁垫板下高弹垫板。道岔区采用轨下高弹垫板。
5	有砟道床	设置道床隔振垫、排水明沟
6	有砟预应力混凝土轨枕（新II型）	设置减振沟
7	有砟预应力混凝土长轨枕	铺设无缝线路，采用 DJK5-1 型弹性分开式扣件
8	有砟道床	/
9	有砟梯形轨枕，无缝轨道	设置梯形轨枕、弹条III型分开式扣件
10	有砟道床	/
11	有砟道床	设置道床隔振垫、排水明沟
12	有砟道床，新II型钢筋混凝土长枕	全部采用弹性扣件，混凝土枕部分采用弹条I型

表 3 试车线上盖建筑实测振动和建模分析结果统计

项目号	实测振动结果	建模分析结果

1	楼板车致振动频率集中，在基频附近出现最大峰值，楼板跨中响应 Z 振级：一层 54-57dB；三层 60-65dB；五层 62.5-69dB；七层 63-69dB	加速度响应时程图与实测数据接近，频谱也符合良好。
2	住宅建筑测点位于 1 层、3 层、5 层、7 层和 10 层边柱及楼板中心，其加速度级最大值分别为 51dB、49dB、50dB、51dB、52dB	振动变化趋势与实测值吻合较好，能够模拟列车引起上盖结构的振动，误差小于 5%。车速为 40km/h 时，加速度级为 46-62dB；车速为 60km/h 时，加速度级为 57-86dB；车速为 80km/h 时，加速度级为 80-100dB
3	/	在 11 层住宅楼每一层都布置考察点，减振前各考察点竖向加速度峰值在 0.169-0.447m/s^2 之间；减振后各考察点的竖向加速度峰值在 0.030-0.167m/s^2 之间。
4	在 14 层住宅楼第 1、2、4、7、14 层各布置一个测点，共 5 个测点。竖向加速度级 1 层 44.5dB，2 层 47.2dB，4 层 64.9dB，7 层 66.1dB，14 层 62.8dB；水平向加速度级 1 层 55dB，2 层 59dB，4 层 65dB，7 层 62dB，14 层 63dB	/
5	所有楼层的水平振动速度级均小于 50dB，竖向振动 1 层 40-62dB,4 层 38-62dB。7 层 37-61dB，10 层 40-54dB，14 层 40-62dB	/
6	/	无隔振沟的情况下，振级逐层增大，为 77.7-79dB；有隔振沟的情况下，振级逐层增大，为 70.7-72.8dB
7	对住宅 1～5、7、9、11、13、15、19、23、26 层室内进行垂直衰减断面的振动影响监测，VL_{zmax} 平均值在 52.9-66.5 dB 之间,最高值出现在第 3 层,最低值出现在第 26 层。	/
8	共布置 7 个测点,分别位于地面层、车辆段 9m 盖板、上盖平台层/1 层、4 层、8 层、16 层及屋顶层靠近剪力墙的楼板上,收集试车线 10 趟列车数据。试车线列车运行速度为 60 km/h 时,加速度级 28.0-64.9dB；以 20km/h 车速运行所致振动加速度级 20.2-58.0dB。	/
9	试车线 Z 振级为 81.95dB，地面 Z 振级为 50-63dB	选取各楼 层户客厅跨中点作为观测点。输入试车线荷载与检修线荷载，测得 1 户型 0-67dB，2 户型 0-65dB，3 户型 0-62dB，4 户型 0-55dB
10	在厂房各楼层共布置 5 个测点，顶层 1 个，3 层 2 个，2 层 1 个，1 层 1 个。加速度级 1 层断面 A34-76.2dB,2 层断面 B18-48.9dB，3 层断面 A17-74.9dB，3 层断面 B17-64.5dB，顶层断面 A18-66.6dB	/
11	试车线临近 3 层建厂房内部布置 4 个测点，1 层 1 个，3	计算了距离车辆段试车线 20 m 处的临近建筑物中

	层 2 个，屋顶 1 个。测得 1 层竖向振动平均值 73.06dB，水平振动平均值 61.02dB;3 层竖向振动平均 75.69dB，水平振动平均值 63.93dB;屋顶层竖向振动平均值 69.33dB，水平振动平均值 60.89dB	第 1 层、第 3 层和顶层的竖向振动加速度，模型预测的建筑物各层的加速度随时间的变化趋势与实测变化趋势比较吻合
12	在住宅的 1、3、4、5、7、9、11、13 层的室内进行垂直衰减断面的振动影响监测，VLzmax 平均值在 47.8-57dB 之间。	/

表 4 试车线上盖建筑环境振动影响评价

项目号	环境振动影响评价
1	在车速不超过 35km/h 时，试车线上盖 8 层住宅建筑的平均 Z 振级满足《城市区域环境振动标准》的要求。在车速超过 35km/h 但不超过 45km/h 时，在铺设道床减振垫的基础上再采用减振扣件，试车线上盖 8 层住宅建筑的平均 Z 振级方满足《城市区域环境振动标准》的要求。
2	试车线车速为 40km/h 时，上盖 10 层住宅建筑室内振动满足规范限值要求；车速为 60km/h 时，设置道床隔振垫后，上盖 10 层住宅建筑室内振动满足规范限值要求；车速为 80km/h 时，设置道床隔振垫后，上盖 10 层住宅建筑室内振动超出规范限值要求，超标量为 10dB 左右，应追加采用减振效果为 10db 左右的减振措施。
3	车速 50km/h，在设置减振道床垫和隔振沟的情况下，试车线上盖 11 层住宅竖向振动舒适度指标满足规范限值要求。
4	车速为 40-45km/h 时，试车线上盖 14 层住宅的最大振级基本满足《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》的要求，在个别位置超出夜间限值 1-3dB，应追加采用减振效果为 3db 左右的减振措施。
5	试车线车速 13-57km/h，上盖 14 层建筑室内振动满足规范限值要求。
6	车速 60km/h，设置减振沟后，结构振动减小了 5-7dB，但 18 层振级达到 70～73dB，不满足振动限值要求，应追加采用减振效果为 10db 左右的减振措施。
7	在采用铺设无缝线路，采用 DJK5-1 型弹性分开式扣件情况下，试车线上盖 26 层住宅的最大振级满足《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》的要求。
8	试车线上 28 层高层建筑，限速 60km/h 时满足规范限值要求。
9	在采用合适的减振降噪措施之后，试车线平台上盖 30 层的超高层住宅二次噪声略微超标，超标量在 1dB 左右，应追加采用减振效果为 1db 左右的减振措施。
10	车速 60km/h 以下，水平距离试车线不小于 20m，地面试车线附近厂房建筑的室内振动指标满足规范的要求。与试车线轨道的水平距离为 20 m 的室内测点最大振级分别为 67.7、70.8 dB，均超过了昼间振动限值标准，超标量为 3-6dB。
11	试车线车速 13-57km/h，距离试车线 20m 的 3 层建筑物室内测点振级指标略微超标；距离试车线 20m 以外的 3 层建筑室内振动基本符合规范限值要求。
12	上盖 13 层住宅满足规范限值的要求。

4.地铁试车线上盖建筑环境振动影响分类

本文依据表 1~4，将地铁车辆段上盖建筑划分为以下几种类型。

（1）第一类。当列车车速在 25km/h 以下时，住宅、办公楼等民用建筑，不需要外加减振降噪措施，也不需要建模分析。

（2）第二类。当列车车速在 25~45km/h 范围内时，住宅、办公楼等民用建筑，采取减振扣件、弹性

轨枕、减振道床垫、弹性车轮等基本减振降噪措施后，不需要进行建模分析。

（3）第三类。当列车车速在 45~60km/h 范围内时，住宅、办公楼等民用建筑，采取橡胶/钢弹簧浮置板、特殊减振道床、梯形轨枕、隔振支座等高效减振降噪措施后，不需要进行建模分析。

（4）第四类。当列车车速大于 60km/h 时，且有特殊要求的建筑，比如大会堂、博物馆、歌剧院等，应对该建筑进行建模分析确定其振动最不利点之后，再采取相应减振降噪措施控制其振动，使建筑的振动指标达到规范限值的要求。

表 5 对这四类情况做了简明的、对结构设计师而言颇具实操性的梳理。一般来说，没有特殊要求的地铁上盖建筑绝大多数都属于前三类，不需要通过建模分析去预测上盖建筑的舒适性。

表 5 地铁试车线上盖建筑环境振动影响分类

地铁上盖建筑环境振动影响分类	列车车速	建筑类型	振动计算分析及减振降噪措施
第一类	列车车速在 25km/h 以内	住宅、办公楼等民用建筑	不需要外加减振降噪措施也不需要建模分析
第二类	车速在25km/h到45km/h范围内	住宅、办公楼等民用建筑	采取基本减振降噪措施，不需要进行建模分析
第三类	车速在45km/h到60km/h范围内	住宅、办公楼等民用建筑	采取高效减振降噪措施，不需要进行建模分析
第四类	车速在 60km/h 以上	有特殊要求的建筑	对该建筑进行建模分析确定其振动最不利点之后采取对应减振降噪措施控制其振动使建筑达到规范限值的要求

具体设计时，结构工程师对照表 5，根据设计项所在车辆段的轨道结构类型、轨交专业设计阶段所采用的减振降噪措施，按如下步骤进行判断：

1）在地铁上盖平台之上不采取减振降噪措施时，是否需要通过建模分析去预测上盖建筑的舒适性，如果不需要，结构设计师则省去了地铁振动的复杂的建模分析。

2）如果需要计算，结构设计师则向甲方推荐合适的基本减振降噪措施，确保该项目在地铁上盖平台之上采用基本减振降噪措施后，不需要建模分析预测上盖建筑的舒适性。

3）对于地铁上盖平台之上采用基本减振降噪措施后，上盖建筑的舒适性仍然无法达标的项目，结构设计师则向甲方推荐合适的高效减振降噪措施，确保该项目在地铁上盖平台之上采用高效减振降噪措施后，不需要建模分析预测上盖建筑的舒适性。

4）对于地铁上盖平台之上采用高效减振降噪措施后，上盖建筑的舒适性仍然无法达标的项目，则需要进行建模分析去进一步预测上盖建筑的舒适性。

需要指出的是，上述第 4）步，地铁上盖平台之上采用高效减振降噪措施后，根据表 5 判断舒适性无法满足要求的情况，经建模分析，上盖建筑的舒适性有可能满足要求，也有可能不满足要求。对于采用高效减振降噪措施后仍然不满足舒适性要求的项目，结构工程师可以建议甲方减少建筑物层数，或者建议甲方将舒适性不满足要求的那几层，改变它们的建筑用途。

5.结论

（1）城市地铁上盖建筑环境振动影响现有评价方法主要为现场实测法和建模分析法。现场实测法具有较高的准确性和可靠性，但也具有滞后性，无法实现建筑结构一体化设计。建模分析法虽然可以实现振动预测，提前获得建筑振动指标，但建模分析计算量大，成本高，对技术人员要求高，准确性也有待验证。

（2）对车辆段地铁车辆段上盖建筑物项目进行了统计分析，研究了城市地铁车辆段上盖建筑环境振动影响分类标准。具体设计时，结构工程师可以对照表 5，根据设计项目所在车辆段的区域、轨道结构类

型、轨交专业设计阶段所采用的减振降噪措施进行建筑结构设计。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目（2023YFC3007305，2019YFC1509403）和国家自然科学基金（51978633，51678537）的资助与支持。在此，向为本项目提供资金支持的科研机构表示感谢。

参考文献

[1] 韩宝明,余怡然,习喆,等. 2023 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2024, 37 (01): 1-9.

HAN Baoming, YU Yiran, XI Zhe, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2023: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 1-9.

[2] 谢伟平,袁葵,孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37 (03): 99-107.

XIE Werping, YUAN Kui, SUN Liang ming. Traininduced Vibration Test of Metro Depot Over-track Buildings[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(3):99-107.

[3] 曹志刚,王思崎,许逸飞,白晓东,袁宗浩,马夏飞. 地铁车辆段上盖建筑道砟垫减振机理与效果[J]. 浙江大学学报(工学版),2023,57(01):71-80.

CAO Zhi-gang, WANG Si-qi, XU Yi-fei, BAI Xiao-dong, YUAN Zong-hao, MA Xia-fei. Vibration mitigation mechanism and effect of ballast mats for over-track buildings on metro depot. Journal of Zhejiang University(Engineering Science)[J], 2023, 57(1): 71-80 doi:10.3785/j.issn.1008-973X.2023.01.008

[4] 赵娜. 地铁上盖物业的振动舒适度研究[D].武汉理工大学,2012.

ZHAO Na. Vibration Serviceability Research on Top Head Estates of Subway[D].Wuhan University Of Technology,2012.

[5] 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].华南理工大学,2015.

ZENG Ze Min.Field Experimental Study on Vibration and Noise EffectInduced by Train Running in Metro Depot[D].South China University Of Technology,2015.

[6] 邹超. 地铁车辆段及上盖建筑物振动传播规律及减振技术研究[D]. 华南理工大学, 2017.

ZOU Chao.Train-induced Vibration Transmission and Mitigation inMetro Depot and Over-track Buildings[D].South China University Of Technology,2017.

[7] 郑辉. 减振沟技术在地铁车辆段上盖开发中的研究及设计应用[J]. 铁道标准设计,2018,62(11):150-154.

ZHENG Hui.Research and Design Application of Vibration Damping DitchTechnology in Metro Depot with Upper Property Development[J].RAILWAY STANDARD DESIGN,2018,62(11):150-154.

[8] 林楚娟,等. 地铁车辆段试车线振动传播规律[J]. 都市快轨交通,2015,28(05):77-81.

LIN Chu Juan,et al.The vibration propagation law of the test line of the subway depot[J].Urban Rapid Rail Transit,2015,28(05):77-81.

[9] 邹超,陈颖,胡子豪,何卫. 地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究[J]. 噪声与振动控制,2022,42(06):181-186.

ZOU Chao, CHEN Ying, HU Zihao,HE

Wei.Train-induced Vibration Transmission within Over-track Buildings in Different Areas of Metro Depot[J].Noise and vibration control,2022,42(06):181-186.

[10] 王子玉. 地铁车辆段环境振动现场试验与仿真分析[D].华东交通大学,2018.

WANG Zi Yu.Field Test and Simulation Analysis on Environmental Vibration of Metro Depot[D].East China Jiaotong University,2018.

[11] 汪益敏,等. 地铁车辆段试车线列车振动影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42 (12): 1-8.

WANG Yi Min,et al.Experimental Investigation into Train-nduced Vibrations of Test-Lineat Metro Depot[J].Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2014, 42 (12): 1-8.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.