

地铁上盖建筑隔振措施研究综述

张 颖

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月30日

摘 要

随着城市的快速建设与发展, 城市的土地资源日益紧缺, 为了更合理地利用土地资源, 借鉴香港城市发展的相关案例, 发展地铁车辆段上盖空间就成为了一个有效的途径。本文通过对地铁车辆段上盖高层建筑这一建筑类型进行研究, 分析了其设计上存在的问题, 提出了将隔振技术应用到地铁车辆段上盖开发中, 以解决采用传统抗振技术所导致的抗振性能不足的问题。同时, 介绍了隔振结构的基本原理, 着重对层间隔振体系的特点与适用范围进行了讨论。

关键词

地铁上盖, 列车振动, 层间隔振, 抗振性能

Summary of Research on Vibration Isolation Measures of Subway Superstructure

Ying Zhang

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 30th, 2023

Abstract

With the rapid construction and development of the city, the city's aboveground resources are increasingly scarce. In order to make more rational use of the aboveground resources, it has become an effective way to develop the aboveground space of the subway depot by referring to the relevant cases of urban development in Hong Kong. This paper studies the high-rise building on the top of the metro depot, analyzes the problems in its design, and proposes to apply vibration isolation technology to the development of the top of the metro depot to solve the problem of insufficient vibration resistance caused by the use of traditional vibration resistance technology. At the same time, the basic principle of vibration isolation structure is introduced, and the characteristics and scope of ap-

plication of the interlayer vibration isolation system are emphatically discussed.

Keywords

Metro Upper Cover, Train Vibration, Interval Vibration, Vibration Resistance

Copyright © 2023 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

在城市建设的大背景下,土地是稀缺资源,轨道交通车站及车辆段上方空间的开发利用将是大城市交通建设发展的必然趋势[1]。然而,地铁列车行驶于地下(或地面、高架)线路的轨道结构上,由准静态激励和动态激励而产生的振动,经隧道基础和衬砌结构传递到周围的土层中,再经地层向各个方向传播,激励附近的地下或地面建、构筑物产生振动,并进一步诱发室内结构和物品产生二次振动和噪声[2] [3] [4]。同时,随着科技的不断发展,人们对生活质量的追求、精密仪器设备对于工作环境的要求不断提高。这种不断显著的激励振动影响与不断提高的承振能力要求之间的矛盾造成了轨道交通列车振动环境影响的问题越来越敏感。

2. 轨道列车振动环境影响

2.1. 对人体的影响

当居住或工作在发生振动的建筑物或构筑物中的人完全暴露在振动环境中,会损害人体健康、干扰日常生活、降低工作效率。

从频率角度分析,身体各部位存在固有频率,有害振动频率与身体各部位的固有频率相近,会造成共振,后果严重时损害人体健康。例如振动频率在 0.1 Hz~0.2 Hz 时,使身体平衡组织共振,造成晕眩等感觉;在 4 Hz~8 Hz 时,使身体腹腔和胸腔共振,让人感到心烦意乱;长期处于 30 Hz 以下振动环境中,对关节有所损伤;30 Hz 以上的振动环境,易使血管发生痉挛。超过 65 dB 的振动对沿线居民有很大的影响,振动强度越大,对居民的睡眠的影响愈大[2] [3]。除此之外,当人体长期处于超标振动环境中时,易产生各种疾病,危害健康。

2.2. 对建筑结构的影响

地铁运行引起的振动是周期性的,从长期影响角度而言,地铁沿线结构物相当于受到动力疲劳荷载,这将对结构产生应力集中与动力疲劳效应,严重时还可能会导致结构的整体或者局部失稳,产生地基液化、基础不均匀沉降等安全隐患。

2.3. 对特殊功能建筑物的影响

音乐厅、歌剧院、医院、博物馆等一些具有特殊功能的建筑场所,在其正常使用时,往往对振动有着极为严格的环境要求。考虑到附近轨道交通运行引起的室内二次噪声的严重影响,被称作“世界上十个最好的音乐厅之一”的瑞士巴塞尔音乐厅采用了钢弹簧浮置板轨道技术进行隔振;中国国家大剧院的录音厅采用房中房隔振技术,成功地隔绝了附近北京地铁 1 号线列车运行引起的振动影响[2]。此外,在

上海地铁 10 号线对上海音乐学院的教学楼和实验剧场、北京地铁 8 号线对北京中医医院的科研医技楼、成都地铁 2 号线对规划中的成都博物馆等工程实例中, 地铁列车振动都对特殊功能建筑物的正常使用构成了影响[5] [6]。

由此可见, 地铁上盖建筑结构在进行设计时, 要充分考虑地铁振动引起的振动与噪声危害, 以使其能充分发挥自身作用。但是不应再过多纠结于轨道结构减振措施, 而是从振动影响规律、振动传播路径以及受振体自身特性等多角度、全方位出发, 采取合理减隔振措施, 以解决地铁线路走向与建筑物用地之间的矛盾, 尽可能降低地铁振动对临近建筑物的影响, 保证地铁隧道沿线居民正常生活, 为建设绿色地铁及促进城市繁荣做出贡献, 具有非常重要的意义。

3. 振动控制措施研究

3.1. 振动控制原理

在进行竖向振动控制时, 主要采用建筑结构基底减隔振方式。现以结构动力学单自由度理论, 简要说明减隔振的基本概念设计方法。

假设对建筑结构竖向激励荷载为一正弦函数, 建筑结构简化为单自由度结构体系。假设横坐标轴为激励频率与系统固有频率的比值 $\eta = f_e / f_0$, 简称调谐比; 纵坐标轴为传递到基础上的基础力 f_2 振幅与激励力 f_1 振幅之比 V_f , 简称传递比。

按照结构动力学推导, 可以知单质点 - 单自由度振动系统稳态的振动传递函数表达式为:

$$V_f = \frac{1 + 4D^2\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \quad (1.1)$$

其中, 系统固有频率为: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$, 系统的阻尼比为: $D = \frac{r}{2\sqrt{km}}$ 。

3.2. 建筑结构隔振措施

目前所采用的隔振方式主要有三种[7]: 振源处隔振、传播途径隔振、建筑结构基础隔振。振源处隔振主要是指对轨道进行减振改造或采用浮置板轨道隔振[8] [9], 是新建地铁轨道常用的隔振技术, 但对于已建成的地铁轨道, 由于技术限制或造价原因往往无法进行改造; 传播途径隔振主要是指在振源和建筑结构之间设置波障, 通常包括隔振沟、排桩等[10], 其建设成本较高, 且并不适用于地铁正上方建筑结构; 建筑结构基础隔振通常指在基础和上部结构之间设置振动控制层, 阻隔地铁振动波向上部结构扩散[11], 对于地铁沿线新建的上盖及周边结构, 该方法可行性高且经济性好, 是目前研究的主要方向之一。

隔振体系是指将由隔振支座、阻尼器等耗能装置组成的隔振层设置于建筑物的基础或地下室和上部结构之间, 从而使整体建筑由隔振层分为三个部分: 隔振层上部结构、隔振层、隔振层下部结构。当振动产生时, 其能量经由下部结构传递到隔振层中, 此时隔振层中的支座与其它耗能原件等装置发挥作用, 吸收大部分能量, 从而使上部结构仅受到很小的能量, 其所受到的振动响应大大降低, 整体结构的安全性得到了提高[12] [13]。

在实际工程中, 隔离地铁振动应用最广的便是钢弹簧隔振器, 其具有竖向抗压强、反应灵敏、性能参数稳定等特点。国内外学者对其进行了大量研究。

3.3. 国内外研究现状

德国最早将钢弹簧装置应用在控制轨道交通引起的振动, 在轨道浮置板中设置钢弹簧装置, 以控制

轨道交通引起的环境振动。在 20 世纪 60 年代,德国的 Senmann 等[14]教授设计了两种应用钢弹簧装置的浮置板,并将此浮置板应用在苏黎世等城市的轨道建设中。Nelson [15]对浮置板轨道的振动在轨道交通扰动下的隔振效果进行分析,研究表明,钢弹簧装置浮置板在轨道交通扰动下表现出良好的隔振效果;Crockett 和 Pyke [16]对高架桥中的浮置板进行研究,研究结果表明,钢弹簧装置浮置板能够有效降低噪声辐射,其振动控制效果相比较其他轨道结构更好。Hussein 和 Hunt 通过在对旧金山的城市轨道交通进行的现场测试,结果表明,当钢弹簧浮置板减振系统的固有频率与列车车轮的转动频率接近时,振动响应有放大的趋势[17] [18]。Lombard 和 Degrand [19]应用有限元分析软件,建立了钢弹簧浮置板道床数值模型,分析其在轨道交通扰动下的隔振效果,研究结果表明,在轨道交通扰动频率比钢弹簧浮置板道的固有频率较大时,此时钢弹簧装置的会表现出较好的隔振效果。

国内一些学者对钢弹簧隔振器也进行了一些研究,探究其在振动控制中的效果。凌育洪等[20]、杨惠喜[21]以某实际工程项目为例,在建筑结构底部安装钢弹簧隔振装置,验证钢弹簧系统在振动控制中的应用效果。有关钢弹簧隔振装置的研究目前大部分是针对内置钢弹簧隔振装置的轨道浮置板轨道的研究,钢弹簧浮置板轨道是一种减振性能良好的轨道形式,根据中国铁道科学研究院的模型试验结果,钢弹簧浮置板轨道的减振效果可达 20~30 dB [22]。李林峰等[23]、丁德云等[24]、梁上燕等[25]对应用钢弹簧隔振减振装置的轨道浮置板进行研究,分析了钢弹簧浮置板轨道在不同轨道交通激励下的减振效果,确定了轨道的固有频率和振型,分析其传导比特性,结果表明,隔振器刚度是影响钢弹簧浮置板轨道低阶固有频率的主要参数,且适当降低隔振器的刚度,可以提高浮置板轨道的隔振性能。

4. 结论与展望

本文针对现有的地铁上盖建筑结构隔振措施进行了研究,对于地铁车辆段上盖建筑开发,宜采用层间隔振技术。

现有研究中存在的一些不足和注意事项,需要我们在今后的研究工作中进一步解决:

- 1) 对于大跨度建筑结构而言,建立准确的结构模型是一件非常困难的事情,我们需要合理地考虑结构的考虑布置方式、局部构造、结构类型及边界条件等因素对振动舒适度的影响,有待进一步的研究。
- 2) 在进行数值模拟时,地铁振动的输入模式现大多采用与地震动一致的方式,模拟结果与竣工实测结果存在一定出入,因此,振动输入方式有待进一步研究。

参考文献

- [1] 周莉. 轨道交通上盖建筑的振动环境影响以及应对措施研究[C]//中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第八卷). 2013: 7.
- [2] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 马蒙. 基于敏感度的地铁列车振动环境影响预测及动态评价体系研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [4] 刘维宁, 袁扬, 王文斌, 吴宗臻. 地铁列车运行引起环境振动响应的人工单点列脉冲激励预测方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 74-79.
- [5] 刘卫丰, 吴宗臻. 北京地铁 8 号线北京中医医院科研医技楼环境振动测试报告[R]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [6] 刘卫丰, 李克飞, 聂志理. 北京地铁 s 号线北京中医医院科研医技楼环境振动预测分析报告[R]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [7] Loverde, J. and Dong, D.W. (2016) Isolation of Residential Buildings from Ground Vibration from Railroad. *Acoustical Society of America Journal*, **140**, 3281. <https://doi.org/10.1121/1.4970427>
- [8] Nelson, J.T. (1996) Recent Developments in Ground-Borne Noise and Vibration Control. *Journal of Sound & Vibration*, **193**, 367-376. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0277>
- [9] 孙晓静, 刘维宁, 张宝才. 浮置板轨道结构在城市轨道交通减振降噪上的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005,

- 15(8): 65-69+114.
- [10] Zhang, S., Wang, W. and Wu, Z. (2017) Effect of Periodic Pile Row in Subway Vibration Isolation. *Procedia Engineering*, **199**, 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.043>
- [11] 张晖, 盛涛. 地铁运行诱发建筑物振动的竖向基础隔振现场模型试验分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(13): 22-26.
- [12] 张谨, 段小甘, 杨律磊, 龚敏锋, 郑志刚. 动力弹塑性分析方法及其在结构设计中的应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(20): 1-9.
- [13] 薛有伟. 框架-剪力墙隔震结构罕遇地震下的抗震性能分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [14] Senmann, E.I., et al. (1998) Reduce Noise and Vibration of Subway and Rapid Transit Systems under the Rail Foundation: Department of Science and Technology Information Institute.
- [15] Nelson, T. (1996) Recent Developments in Ground-Borne Noise and Vibration Control. *Journal of and Vibration*, **193**, 367-376. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0277>
- [16] Crockett, A.R. and Pyke, J.R. (2000) Viaduct Design for Minimization of Direct and Structure-Radiated Train Noise *Journal of Sound and Vibration*, **231**, 883-897. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2645>
- [17] Hussein, M.F.M. and Hunt, H.E.M. (2006) Modelling of Floating-Slab Tracks with Continuous Slabs under Oscillating Moving Loads. *Journal of Sound and Vibration*, **297**, 37-54. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.03.026>
- [18] Hussein, M.F.M. and Hunt, H.E.M. (2009) A Numerical for Calculating Vibration Due to a Harmonic Moving Load on a Floating-Slab Tracks with Discontinuous Slabs in an Underground Railway Tunnel. *Journal of Sound and Vibration*, **321**, 363-374. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.09.023>
- [19] Lombard, G. and Degrand, G. (2006) The Control of Ground-Borne from Vibrations from Railway Traffic by Means of Continuous Floating Slab. *Journal of Sound and Vibration*, **297**, 946-961. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.05.013>
- [20] 凌育洪, 吴景壮, 马宏伟. 地铁引起的振动对框架结构的影响及隔振研究——以某教学楼为例[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 184-189.
- [21] 杨惠喜. 钢弹簧隔振系统在地铁邻近建筑物的设计应用[J]. 现代城市轨道交通, 2014(6): 44-46+62.
- [22] 王澜, 宣言, 万家, 等. 浮置板式轨道结构隔振效果仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(6): 48-52.
- [23] 李林峰, 马蒙, 刘维宁, 等. 不同激励作用下钢弹簧浮置板轨道减振效果研究[C]//第 26 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 2017: 5.
- [24] 丁德云, 刘维宁, 李克飞, 等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 30-35.
- [25] 梁上燕, 肖安鑫, 耿传智. 阻尼钢弹簧浮置板轨道结构隔振性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(1): 136-139.