

地铁振动对博物馆建筑影响及控制措施分析

Analysis of Control Measures for Metro Vibration and Its Impact on Museum Building

任 巍

Ren Wei

(首都博物馆, 北京, 100045)

(Capital Museum, Beijing, 100045)

内容提要: 地铁运行引发的环境振动对周边受振动敏感的博物馆建筑, 特别是其内的人员、馆藏文物、文物保护实验使用的精密仪器均会产生不利影响。目前国内关于地铁低频微振动对馆藏文物影响及其防护措施方面的研究成果不多, 亟待加强研究力度。本文从地铁振动的产生、传播特性及规律、对博物馆建筑影响以及控制措施等方面进行分析, 提出宜采取综合减振措施, 有效降低地铁振动对博物馆建筑的影响。文物保护实验使用的精密仪器可在综合减振的基础上设置隔振台。

关键词: 地铁振动 博物馆建筑 馆藏文物 精密仪器 控制措施

Abstract: The environment vibration that the metro movement causes is subjected to museum of the vibration sensitive to the periphery building, especially it inside of personnel, museum collection, museum collection to protect the precision instrument of experiment the use all will produce disadvantageous impact. Currently domestic concerning metro low frequency the tiny vibration for museum collection impact and it research achievements of protection measures are few, need to be strengthened for research. This article vibrated from the metro of creation, dissemination characteristic and regulation, carried on analysis to the museum building impact and control measures etc, put forward proper adopted to synthesize measures to reduce vibration, effectively lower the metro vibration is to the impact that museum building. The museum collection to protect the precision instrument of experiment the use can at synthesize measures the foundation for reducing vibration, adopt to set up the measure of vibration isolation platform.

Key Words: Metro vibration; museum building; museum collection; precision instrument; control measures

一、引言

随着我国城市交通建设的飞速发展, 地铁作为

一种快速的城市轨道交通工具, 以其安全、便捷、高效、环保等特点而与其他城市交通工具相比具有显著优势。它不但可以有效缓解大城市交通拥堵的状况, 而且对改善人民生活品质、推动城市旅游

业，乃至经济社会的发展也起到至关重要的作用。但地铁线路邻近周边多有建筑物，甚至下穿建筑物，在运行时引发环境振动，不仅影响周边居民的工作和生活，还对博物馆、剧院、音乐厅、医院等一些具有特殊性功能且对振动较为敏感的建筑物产生不利影响。

作为保存文物场所的博物馆建筑，出于文物保护的需要，对地铁交通等工业振动的控制具有很高的要求。而且一些博物馆文物保护实验使用的精密仪器也会不同程度地受到地铁振动的干扰，导致无法正常使用。因此，采取合理有效的控制措施，避免地铁交通等工业振动对博物馆建筑造成的不利影响，已成为亟待解决的问题。

二、地铁振动的特性分析

（一）地铁振动的传播特性

地铁振动产生的原因主要是在列车运行过程中，车轮经过在钢轨上滚动，轮轨之间的撞击与摩擦而产生的轨道结构振动。地铁振动的传播规律极为复杂。首先经过钢轨传递到钢轨扣件，再经过道床传递到隧道，最后通过土壤传递到周边的建筑物，并通过建筑物的基础结构、地板、墙体、天花板、门窗等引发建筑物内二次结构噪声。据地铁列车振动的实测表明，离轨道中心线30米之内的振级大部分接近80dB^[1]。地铁列车运行引起的环境振动频谱一般有两个峰值：低频为10—15Hz，高频为30—50Hz。随着距地铁线路中心线水平距离的增大，高频振动衰减很快，对地面建筑物有影响的振动频率主要在20Hz以内^[2-4]。由此可见，地铁运行时传播到沿线周边建筑物内的主要是低频振动。这种振动的特点是波长较长，传播距离远，而且很难在土壤中减弱。地铁运行还会引起地面水平向振动和铅锤向振动，两种振动在传播过程中的衰减特性存在差异。铅锤向振动在传播过程中比水平向振动衰减得慢，由此引发地铁周边建筑物结构的铅锤向振动振级要大于水平向振动，所以应以铅锤向振动作为建筑物受地铁振动影响的主要参考依据。

（二）影响地铁振动传播的因素

地铁振动传播受多种因素影响，主要包括列车运行速度、列车载重、轨道平顺度、隧道埋深、土壤条件、建筑结构等。其中，列车运行速度越快，地面振动加速度越大，传播至地铁沿线周边建筑物的振动响应也就越大。根据对我国某城市地铁车辆段附近进行的现场测试结果表明，当地铁列车以15—20km/h的速度通过时，地铁正上方居民住宅的振动高达85dB，如果列车速度达到正常运行的70km/h时，其振级可能还要大得多^[5]。此外，列车载重越大，周边建筑物的振动幅度也会随之增大；轨道不平顺可加剧列车的振动加速度，是造成列车运行时产生振动的主要因素之一；隧道埋深对地面振动的影响较大，埋深越浅，地面振动响应越大；土壤条件不同，对地铁沿线周边建筑物的振动影响不同，一般软质土壤会比硬质土壤造成建筑物内的振动响应要大；建筑结构的差异也会导致建筑内振动响应不同，重型结构建筑对于振动衰减的作用要优于轻型结构建筑。

三、地铁振动对博物馆建筑的影响

博物馆作为收藏、保护、展示文物，并为社会服务的公共文化建筑，不同于其他建筑，应具有更为严格的防交通等工业振动要求。而地铁振动对博物馆建筑内人员的舒适性、文物的安全性以及文物保护实验室精密仪器的正常使用均会产生不利影响。其中，地铁运行时引发的环境振动和噪声如果达到一定程度，会使博物馆观众和工作人员感到不适，进而影响观众的参观感受，干扰工作人员的日常办公。如果一个人长期处于地铁振动的干扰下，无论在生理上还是心理上均会出现一定的问题。比如出现精力下降、思维迟缓、情绪焦躁不安等现象。我国为了控制城市环境振动污染，国家环境保护局于1988年批准了《城市区域环境振动标准》（GB 10070-1988），并于次年正式实施。由于制定年代较早，该标准虽明确了城市各类区域振动控制

标准值(表1)^[6],但对博物馆类建筑的振动控制指标未做规定。2008年由国家住房和城乡建设部、国家质量监督检验检疫总局联合发布的《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452-2008),主要针对古建筑结构防工业振动明确相关控制标准及技术措施,并不适宜大部分博物馆建筑。

然而,博物馆建筑是保存文物的重要场所,文物作为不可再生的文化资源,蕴含重要的历史、科学和艺术价值,具有唯一性和不可替代性的特点。特别是一些极为珍贵的文物,其价值甚至超过了博物馆建筑本身。在国家住房和城乡建设部于2015年批准,并于次年正式实施的《博物馆建筑设计规范》(JGJ 66-2015)中明确指出,博物馆建筑设计应满足博物馆藏品防震和防工业振动专项设计的要求^[7]。而地铁振动具有长期性、反复性、频繁性、隐蔽性等特点,尤其是低频微振动对博物馆馆藏文物的危害是潜在、长期、持续的。特别是陶瓷、象牙器、漆木器、泥塑等质地脆弱或易碎易损以及经过修复的文物,在长期、频繁地受到地铁低频微振动影响下,势必会产生疲劳性损害,其安全得不到保障。而且,博物馆文物保护实验使用的精密仪器对环境振动更为敏感,地铁运行时传播至建筑物内的低频微振动对其干扰甚为严重。这些精密仪器通常固有频率很低,在受到低频微振动干扰时,由于频率相近,易于引发共振现象,振动振级随之放大,从而导致精密仪器的精确度大幅降低而无法正常工作,甚至可能会缩短仪器的使用寿命。近些年,国

内已有多起关于科研机构、高等院校中的精密仪器受到地铁振动干扰而无法正常使用的相关报道,地铁振动已越来越受到人们的广泛关注,引起有关部门的重视。

而目前国内关于地铁运行引发的环境振动对博物馆类建筑及其馆藏文物影响方面的研究较少,国家及地方尚未制定针对博物馆类建筑的振动控制标准。鉴于博物馆建筑的功能特殊性,可参考《城市区域环境振动标准》(GB 10070-1988)中特殊住宅区或居民、文教区夜间的振动标准值,即65dB或67dB作为博物馆建筑的振动控制参考值。而对于馆藏文物以及对振动敏感的精密仪器工作环境的振动控制指标,应根据地铁实际运行工况下的环境振动测量数据,并结合试验及相关数值分析,经过技术论证后确定,宜从严控制。

四、控制措施分析

根据地铁振动的产生、传播特性及规律、对博物馆建筑影响等方面分析,可以从振源、传播途径、受振体三个环节采取相应的控制措施。在此基础上,文物保护实验使用的精密仪器可采取设置隔振台的措施。由于现阶段国内基于博物馆馆藏文物受地铁低频微振动影响方面的研究尚显不足,缺乏相关实测数据支撑,故在本文中不对馆藏文物的防振措施进行分析、论述,仅从博物馆建筑特点方面分析相关控制措施。

表1 城市各类区域铅锤向Z振级标准值

(单位: dB)

适用地带范围	昼间	夜间	适用地带范围的划定
特殊住宅区	65	65	特别需要安宁的住宅区
居民、文教区	70	67	纯居民区和文教、机关区
混合区、商业中心区	75	72	一般商业与居民混合区;工业、商业、少量交通与居民混合区;商业集中的繁华地区
工业集中区	75	72	在一个城市或区域内规划明确确定的工业区
交通干线道路两侧	75	72	车流量每小时100辆以上的道路两侧
铁路干线两侧	80	80	距每日车流量不少于20列的铁道外轨30米外两侧的住宅区



（一）振源控制

振源控制是指从地铁振动的主要源头来采取相应的减振措施，这种措施是最为直接的。

1. 轨道减振措施

在《地铁设计规范》（GB 50157-2013）中规定，减振轨道的减振级别宜划分为中等减振、高等减振和特殊减振，并在条文说明中明确，在线路中心距离医院、住宅区、学校、音乐厅、精密仪器厂、文物保护和高级宾馆等建筑物小于20米及穿越地段，宜采用高级及以上减振措施^[8]。目前，国内外针对轨道结构的减振措施较多，主要划分为钢轨类、扣件类、轨枕类和道床类四大类别。实际应用较为广泛的措施包括先锋扣件、轨道减振器扣件、弹性轨枕整体道床、梯形轨枕轨道、橡胶浮置板道床等。上述减振措施比较适用于中、高等减振级别，但对于像医院、音乐厅、博物馆等对振动较为敏感的建筑物，目前国内外普遍采用特殊减振级别的轨道减振措施，应用最为广泛的就是钢弹簧浮置板道床。相比其他轨道减振措施，钢弹簧浮置板道床以其技术成熟、减振效果明显、使用寿命长等特点具有显著优势。近些年，这种减振技术在我国一些大城市的轨道交通中普遍应用。例如北京地铁4号线穿越北京大学东门段，北京地铁5号线穿越雍和宫段，广州地铁3号线穿越珠江电影制片厂段，上海地铁9号线穿越港汇广场、微电子研究所段，深圳地铁1号线穿越深圳大学段，西安地铁2号线穿过钟楼、城墙地段等^[9]。钢弹簧浮置板道床减振技术起源于德国，主要由钢轨、扣件、道床板和钢弹簧隔振器等部件构成。其基本工作原理是利用扣件使钢轨固定在道床板上，再通过钢弹簧隔振器将道床板浮置在基础结构上，也就是使轨道以及道床板通过钢弹簧隔振器与基础结构隔离，以达到减振的效果。钢弹簧浮置板道床自身的固有频率较低，对于高频振动减振效果非常显著，但对于低频振动减振效果不佳，甚至还会在一定程度上放大振动振级，特别是在其固有频率的范围内尤为明显。

2. 其他减振措施

在振源控制方面也可采取其他措施，达到一定的减振效果。包括在满足列车正常运行的基础上，根据地铁线路及地质条件的实际情况，对列车速度进行适度控制；选用轻型且性能良好的列车，并尽量减少列车载重；加强对轨道的保养维护工作，保证其平顺度；在条件允许的前提下，适当加大隧道埋深以及隧道壁厚度。

（二）传播途径控制

传播途径控制是指针对地铁振动在土层中的传播途径采取设置隔振屏障等措施，来阻断振动传播。

1. 调整地铁与建筑间距

在规划条件允许的前提下，可通过调整地铁隧道与建筑物之间的水平距离，以达到降低建筑物振动响应的效果。随着距离的加大，建筑物的振动响应下降较为明显，受地铁振动的影响也随之减少。所以，在地铁线位的规划中要重点考虑其与周边受振动较为敏感的博物馆等建筑的间距问题，使线路尽量远离敏感建筑物。此外，在新建博物馆的选址上也要避免地铁交通等工业振动产生的影响，馆址选择要尽量与地铁线位保持合理距离。但此种措施往往会受到城市轨道交通建设规划的制约，实施存在一定难度。

2. 设置隔振沟

隔振沟是通过在地铁线路周边挖设沟槽的方式，设置隔振屏障，使地铁运行产生的振动波遇到隔振屏障时，会在其背后形成一个屏蔽区，以此来阻断振动波的传播途径，减少地面及建筑物的振动响应。隔振沟的隔振效果取决于深度，深度越深隔振效果越好。但深沟无论从施工角度，还是造价上均需要较大投入。而且这种措施也存在一定局限性，主要是隔振沟随着深度增加，水平向振动衰减效果明显，但对于铅锤向振动不明显。此外，隔振沟对于波长较长的低频振动衰减作用有限，对中、高频振动衰减效果显著。

3. 设置钢筋混凝土连续隔振墙

钢筋混凝土连续隔振墙是在地铁线路附近的建筑物周边地下设置用钢筋混凝土筑成的连续刚性墙。其对于中、高频振动及水平向振动隔振效果较为明显，但对于低频振动及铅锤向振动隔振效果不佳。

（三）受振体控制

受振体控制是指针对受到地铁振动影响建筑物的结构特点以及建筑物内对振动敏感的特殊功能区域采取相应的控制措施。此种措施比较适合新建博物馆，但对于既有博物馆建筑实施难度较大。

1. 调整建筑结构及布局

在条件允许并满足建筑使用功能的基础上，对建筑结构形式及内部功能布局进行适当调整。建筑宜采用重型结构形式，可对建筑基础底板厚度进行适度增加，对于振动敏感的功能区域应避免布置在建筑物振动响应大的部位。

2. 设置弹簧隔振支座或橡胶隔振垫

弹簧隔振支座是设置在建筑地基结构与上部结构之间，利用隔振支座使建筑上部结构全部浮置，形成基于弹簧隔振系统的隔振层。这种措施可有效阻断振动向建筑内传递，尤其可以大幅削减高频振动。此技术已较为成熟，在国外多有应用。近几年，国内也不乏工程实例。最为典型的案例是上海交响乐团音乐厅因紧邻地铁，采用这种措施取得了非常显著的效果。橡胶隔振垫是在建筑的基础底面以及侧面设置，其原理与弹簧隔振支座相似，可在一定程度上阻止振动向建筑上部结构传递，对于高频振动衰减效果明显。

3. 设置“房中房”

“房中房”是指针对建筑内振动敏感以及声学要求较高的房间内再建造一个六面体房间，内部房间底部依靠钢弹簧隔振器支撑在外部房间地面上，内、外部房间的其余五面无刚性连接，并形成空气

层。用于连接内、外部房间的钢弹簧隔振器固有频率较低，可以在很大程度上将振动隔离，而且房间之间的空气层还会对空气声及撞击声起到很好的隔声效果。但采用这种措施时，由于在外部高频振动的激励作用下，钢弹簧隔振器自身的弹性会减弱，而刚性则会增强，从而出现高频振动隔振失效的现象。所以，钢弹簧隔振器通常与阻尼器结合使用，而且还应最大限度的降低钢弹簧隔振器与内部房间的共振频率，以达到较好的隔振效果。“房中房”隔振措施目前已在国内一些剧院、音乐厅的录音室、演播室中大量应用，能够较好地满足实际使用需求。

4. 设置浮筑楼板

浮筑楼板是指在楼板的结构基础地面与楼板面层之间加设弹簧隔振器或其他隔振隔声材料，形成一个弹性支撑垫层，以达到隔振及隔离楼板撞击声的目的。这种措施比较适用于对振动敏感的功能区域或房间，如博物馆内放置精密仪器的文物保护实验室等。

（四）精密仪器防振措施

为有效降低振动对精密仪器的影响，普遍采取的措施是在仪器底部设置隔振台。目前，针对地铁运行产生的低频微振动效果较好的隔振台是空气弹簧隔振台。这种隔振台是依靠由若干个橡胶气囊充气制成的空气弹簧隔振器支撑，固有频率非常低，对于衰减低频振动效果明显。不过存在漏气隐患，需要定期检查。

五、结语

近些年，我国在地铁振动的产生、特性、传播规律、对周边建筑物影响以及控制措施方面的研究均取得了一定成果，但关于地铁振动对博物馆建筑、馆藏文物、文物保护实验使用的精密仪器影响方面的研究甚少，而且国家及地方尚未制定针对博物馆建筑的振动控制标准。然而博物馆是具有较强

的特殊功能性建筑,其对地铁交通等工业振动的控制要求极为严格。目前针对地铁运行产生的环境振动,尤其是低频振动,从振源、传播途径、受振体每个环节的控制措施均存在一定局限性,如果仅采取一种措施效果有限。比如,成都博物馆新馆因紧邻地铁2号线,采取了一系列的控制措施,包括在轨道下铺设钢弹簧浮置板道床;建筑物结构周围设置一圈延伸至地下层的隔振沟;为了避让地铁,建筑物靠近隧道侧设置跨度33米的悬挑结构并挑起地上五层结构^[10]。因此,为有效降低地铁振动对博物馆建筑造成的不利影响,应在对博物馆建筑与地铁线

位的关系、土壤条件、建筑结构形式以及振动敏感的功能区域布局等因素进行全面考量的基础上,采取综合减振措施。尤其是新建博物馆建筑,可从振源、传播途径、受振体三个环节分别采取相应的控制措施,形成多种措施的有效组合。在采取综合减振的基础上,文物保护实验使用的精密仪器还应设置隔振台。

关于地铁低频微振动对馆藏文物影响及其防护措施方面的研究,涉及交通工程学、岩土学、力学、建筑学、文物保护等多专业综合技术,目前国内研究成果不多,需亟待加强研究力度。

参考文献

- [1] 曲经建,夏禾,石红兵.轨道交通系统对周围环境的振动影响[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十四届年会论文集.上海:同济大学出版社,2000:791-796.
- [2] 潘昌实,谢正光.地铁区间隧道列车振动测试与分析[J].土木工程学报,1990(2).
- [3] 王秀英,刘维宁.列车振动作用下沉管地基砂土液化可能性研究[J].铁道学报,2004(1).
- [4] 闫维明,聂晗,任珉,等.地铁交通引起的环境振动的实测与分析[J].地震工程与工程振动,2006(4).
- [5] 夏禾,吴莹,于大明.城市轨道交通系统引起的环境振动问题[J].北方交通大学学报,1999(4).
- [6] 国家环境保护局.城市区域环境振动标准:GB 10070-1988[S].北京:中国标准出版社,1988.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.博物馆建筑设计规范:JGJ 66-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [9] 王会军.城市轨道交通减振垫、钢弹簧浮置板减振降噪效果对比分析及应用[J].城市建设理论研究,2014(13).
- [10] 石建权.地铁运行所致成都博物馆振动全过程性能化分析[D].北京:北京交通大学,2014:59.