

跨座式轨道交通引起的环境振动对古建筑的影响

宋 森¹ 焦 攀² 张利平²

1. 中铁工程设计咨询集团有限公司 北京 100055

2. 中铁工程设计咨询集团有限公司郑州设计院 河南 郑州 450052

摘 要：本文围绕轨道交通发展展开分析，指出其核心作用在于加强城市间的联系，推动社会经济的快速发展。同时，针对轨道交通运行中对环境产生振动这一现象，研究发现其振动频率多集中在1-80Hz，以弹性波的形式从振源向各个方向扩散。本文的研究意义在于，通过探究跨座式轨道交通引发的环境振动对古建筑造成的影响，能够为古建筑保护工作提供更有力的支持，同时为跨座式轨道交通的合理规划建设提供依据，进而促进多领域的协同发展。

关键词：跨座式轨道交通；环境振动；古建筑；影响

0 引言

我国经济建设发展很快，各个行业都在突飞猛进，城市轨道交通也在不断发展。随着城市规模的不断扩大，人流量增加，交通工具的普及，使得交通问题逐渐成为一个主要的社会问题。早在1863年，世界上第一条地下铁路已经修建完成（英国伦敦），这也为城市轨道交通的发展奠定了基础。我国从上世纪60年代北京修建第一条地铁开始，到现在的处处都有地铁的建设，使得城市轨道交通建设发展大为普及。城市轨道交通优势比较明显，其占地少、运量大、速度快，而且准时、方便、舒适，正在并将最终成为城市公共交通的主动脉^[1]。然而，随着城市轨道交通建设的大发展，轨道交通引起的振动问题也越来越明显。

1 城市轨道交通现状

虽然，根据国办发[2018] 52号文件《关于进一步加强城市轨道交通规划建设管理的意见》，取消了环境影响评价中关于跨座式单轨引起的环境振动的影响评价。但是，跨座式单轨引起的环境振动对古建筑的影响分析还需保留在环境影响评价报告书中，并且要进一步加强相关评价内容，做到有理有据、真实准确、量化分析。一方面，火车、地铁线路与文物单位距离较近时通常可以采用调整优化线路，避让文物的方法解决。而跨座式单轨通常以高架线走行于城市道路，调整优化、避让文物的可行性相对较小，而且城市内空间狭小、建筑紧凑，通常导致线路与文物保护单位本体距离非常近^[2-3]。另一方面，有些学者也进行了相关方面的研究并取得了一定的研究成果，但针对跨座式单轨引起的环境振动对古建筑的影响，我们发现既有研究存在以下几点不足：

作者简介：宋森（1990—），男，河北保定人，汉；工程师，硕士研究生，研究方向：环境工程。

（1）既有研究多是对《城市区域环境振动标准》，而非《古建筑防工业振动技术规范》，两者的衡量物理量不同。

（2）既有研究多是对高速铁路、轻轨、地铁等车型较大、车速较快、钢梁钢轨的传统轨道交通制式进行研究，其振动具有频率高，幅值大的特点。针对跨座式单轨这种车型较小、车速较慢、胶轮的制式的研究相对缺乏。

（3）《古建筑防工业振动技术规范》（GB-T 50452-2008）中仅对铁路、地铁、汽车、城铁的震源、频率及衰减系数做出了相应规范，这些规范参数并不适用于跨座式单轨制式。

结合城市的实际情况，使得轨道交通的线路也有差异。受其特点的影响，对于跨座式单轨制式轨道交通规划和可行性研究阶段，基本都会首选高架线路方案。以重庆轨道交通2号线为例，高架敷设方式占91.87%。可以认为高架线是跨座式单轨的主要敷设方式。本研究仅针对跨座式单轨高架线引起的环境振动，即高架桥群桩基础地面振动进行研究分析。

2 城市轨道交通对周边环境的影响

城市轨道交通，因其本身存在的差异性和复杂性，对周边建筑物的影响程度也不同不同程度的影响。具体如下：积极影响：促进经济发展：能带动沿线商业、住宅等开发，像上海的五角场商圈，因地铁线路的完善，吸引了大量商业投资，成为繁华的商业中心，推动城市经济增长。优化土地利用：引导城市空间布局优化，使土地利用更集约。如香港通过地铁站周边的高密度开发，实现了居住、商业与交通的高效融合。减少环境污染：作为绿色交通方式，相比私家车，能减少汽车尾气排放，降低空气污染。以北京为例，轨道交通的发展使

部分市民放弃自驾,减少了城区的污染物排放量。降低噪声污染:一般采用了降噪措施,且行驶噪声比地面公交小。在一些城市,轨道交通沿线的噪声监测数据显示,其运行噪声基本处于环境噪声标准范围内。消极影响:施工期环境影响:施工会产生噪声、扬尘,还可能造成水土流失。如在一些城市的地铁建设中,施工噪声对周边居民生活产生干扰,扬尘也影响了空气质量。运营期噪声影响:列车运行时会产生轮轨噪声、车辆设备噪声等,对沿线居民生活有一定干扰。特别是在没有安装有效隔音设施的路段,噪声问题较为突出。振动影响:列车运行引起的振动会通过轨道传递到地面及周边建筑物,可能影响建筑物的结构安全和居民的居住舒适度。在一些老旧小区附近的轨道交通线路,这种影响更为明显。电磁辐射影响:地铁等轨道交通的供电系统、信号系统等会产生一定的电磁辐射。虽然通常在国家规定的安全标准范围内,但仍会引起部分居民的担忧。因此,对于古建筑的保护已成为目前抢救中华历史文化遗产的重要内容,其保护工作的要求更高、标准更严^[4-6]。未来城市建设将更快、更新、更便捷,但文化遗产也弥足珍贵^[7],因此需把保护文物作为城市发展建设的前提。

3 城市轨道交通特点及适用范围

跨座式轨道交通(如单轨系统)在运营过程中产生的环境振动可能对沿线古建筑的结构安全和长期保存构成威胁。跨座式轨道交通是一种通过单根轨道来支撑、稳定和导向,车体骑跨在轨道梁上运行的铁路^[8-10]。特点:(1)适应性强:能适应复杂地形地貌,爬坡能力强,最大坡度可达60‰,转弯半径小,正线最小转弯半径为100米。(2)噪声低:采用橡胶轮胎,运行时噪声小,约60分贝。(3)占地面积小:一般采用高架敷设,桥墩宽度仅1.4米左右,可建于城市道路中央或路侧绿化带等,不干扰道路交通。(4)建设成本低:投资少,造价成本仅为地铁的三分之一,建设周期也仅为地铁的一半。(5)安全性能好:有半个世纪的安全运营记录,经受了台风、地震等多种自然灾害的考验。

4 城市轨道交通国内发展现状

重庆:拥有2条跨座式单轨线路,2号线是中国首条跨座式单轨线路,因“单轨穿楼”闻名;3号线是全球运营里程最长的跨座式单轨线路。芜湖:已运营的1号线和2号线均为跨座式单轨,是国内首个全自动跨座式单轨。银川:云轨1号线是中国首条实现无人驾驶的跨座式单轨线路。

5 城市轨道交通振动传播与影响机制

5.1 振动源特性

轮轨接触:跨座式轨道通常采用橡胶轮胎与混凝土梁接触,相比钢轨系统,高频振动更显著,但低频振动(1-80 Hz)可能通过地基传播更远。桥梁结构振动:高架桥段的动力响应(如挠度、共振)可能放大振动,尤其在轨道不平顺或道岔区段。

5.2 传播路径

地层传播:振动通过桥墩传入地基,经土层以弹性波形式(瑞利波、体波)向四周扩散,古建筑地基若为松散沉积层或回填土,可能放大振动。空气噪声:二次辐射噪声可能对古建筑内部陈设(如壁画、木雕)造成微振动影响^[11]。

5.3 古建筑脆弱性

结构特性:传统木构、砖石结构对低频振动敏感,易发生累积性损伤(如榫卯松动、砌体开裂)。历史病害:已有裂缝、风化部位在循环振动下可能加速扩展。

6 跨座式轨道交通与文物保护

文物建筑的损坏往往体现在两个既相互关联又各有侧重的方面,二者均对文化遗产的存续构成威胁,需区别对待并加以重视。一方面是结构性破坏,这是威胁文物建筑安全的核心问题,通常涉及建筑主体结构的损伤或失效。这类破坏多源于承重体系的受损,比如梁柱因材质老化、受力失衡出现开裂、变形,甚至榫卯结构松动脱节;墙体因地基不均匀沉降产生贯通性裂缝,导致整体稳定性下降;屋顶桁架腐朽或受力过载引发坍塌风险等。结构性破坏具有隐蔽性强、发展迅速的特点,初期可能仅表现为细微形变,但若未及时干预,可能在短时间内导致建筑整体失稳,甚至造成不可逆转的坍塌,直接危及文物的物理存在,因此需要优先排查和处理。另一方面是建筑性损伤,主要指向文物建筑表面及装饰部分的损坏,虽不直接威胁结构安全,却关乎其历史价值与艺术完整性。这类损伤包括墙体彩绘褪色、剥落,木雕、石雕构件被风化、侵蚀,砖面、瓦件因长期风化出现酥碱、碎裂,门窗棂格变形或五金件锈蚀等。建筑性损伤若持续发展,会逐渐消解文物的历史文化内涵,使其艺术价值大打折扣,因此同样需要给予足够关注,通过精细化保护延缓其衰减过程。经过现场实测和上文分析,跨座式单轨引起的水平振动速度峰值在桥墩3m处约为0.5mm/s,在50m处会衰减至0.002mm/s^[12]。通常认为,当速度峰值小于10mm/s时,是可以满足普通结构安全性要求的,也就是说不会引发建筑的结构性破坏,而对于古旧建筑,该限制会更严一些。跨座式轨道交通对文物的潜在影响:

(1) 振动与结构安全:跨座式单轨列车运行时,

车轮与轨道梁的接触振动通过橡胶轮胎或导向轮传递至地面。尽管其振动幅度通常低于传统地铁,但高频振动(10-80Hz)可能对文物建筑的砖石结构、壁画等造成累积损伤。例如,北京地铁28号线在东岳庙建设控制地带施工时,需通过振动监测和减振轨道设计,将振动速度控制在0.15mm/s以下。

(2) 噪声与环境风貌:单轨列车运行噪声主要来自橡胶轮胎与轨道的摩擦,峰值约70-80分贝,显著低于地铁轮轨噪声(90分贝以上)。这一特性使其在穿越露天遗址或历史街区时,对环境噪声敏感型文物(如苏州园林、西安碑林)的干扰较小。但在特殊地段(如弯道半径小于100米),噪声峰值可升至90分贝以上。

(3) 视觉与空间协调:跨座式轨道梁纤细(通常宽0.8-1.2米),车站造型简洁,可通过仿古建筑、隐蔽工程等设计手法与历史环境融合。例如,常州地铁1号线在延陵路站采用“飞檐斗拱”式站房,与周边明清建筑形成视觉呼应。但高架线路若处理不当,可能破坏文物保护区的天际线。

(4) 施工扰动与地下文物:建设过程中的基坑开挖、桩基施工可能破坏地下文物。宁波地铁2号线二期因施工导致吴杰故居地基沉降,最终通过“先加固后修缮”方案赔偿511万元。跨座式轨道因占地面积小(单线宽度仅4-5米),可减少对地下文物密集区的扰动,但需通过非开挖技术(如顶管法)进一步降低风险。

结束语

跨座式轨道交通运行时产生的环境振动,可能对古建筑结构稳定性、材料耐久性等造成影响,相关研究对古建筑保护与交通建设协调发展具有重要意义。一方面,利于文物保护与交通发展的平衡,另一方面,利于古建筑保护技术的完善。第三方面,可以促进历史文化遗产的可持续利用,最后一方面,能够推动跨学科技术的研究。结合国内外即有标准来看,跨座式轨道交通引起的环境振动非常小,基本不会对建筑造成结构性破坏。相对于其他制式的城市轨道交通,跨座式单轨在建筑物振动影响方面也具有一定的优势。值得注意的是,

不同文物有不同的价值,根据其本身的价值,进行对应的处理,才能不损伤其价值,使得各方面均能够协调发展,更好的保护其价值的发挥。

参考文献

- [1] 刘杰,刘尉艺,王宇浩,等.集成学习框架下的城市轨道交通事故后果预测研究[J].安全与环境学报,2025,3(10):1-11.
- [2] 陈德忠,王鹏.城市轨道交通预制板交叉渡线关键技术研究[J].铁道建筑技术,2025,3(4):1-4.
- [3] 尚敬,张慧源,李晨.具身智能机器人发展研究及轨道交通应用展望[J].机车电传动,2025,2(2):1-14.
- [4] 狄春锋.地下轨道交通超深基坑的沉降变形数值模拟研究[J].重庆建筑,2025,24(03):82-85.
- [5] 邓洁榕,刘晨辉.基于GMM模型的城市轨道交通乘客通勤模式研究——以长沙市为例[J].都市快轨交通,2025,2(1):1-8.
- [6] 周炜杰.关于城市轨道交通隧道下穿重要建(构)筑物的施工技术研究[J].科学技术创新,2025,(08):110-113.
- [7] 宿颜飞.城市轨道交通高架车站光伏系统设计研究[J].科学技术创新,2025,(08):205-208.
- [8] 蒋斌.轨道交通盾构区间下穿文保建筑的保护措施研究[J].四川建材,2025,51(01):179-181.
- [9] 李阳.城市轨道交通振动对文物的影响研究现状[J].城市建设理论研究(电子版),2018,(11):74.
- [10] 赵狮.南昌市轨道交通1号线运营对周围文物建筑振动影响[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(12):306-308.
- [11] 王伯扬.大数据技术对城市轨道交通建设价值链模型的改善建议[J].数字通信世界,2017,(12):185+187.
- [12] 狄文莉,常海青.轨道交通项目规划阶段文物影响评估——以西安地铁五号线为例[J].规划师,2015,31(S2):276-279.