

# 城市轨道交通对西安永宁门古城墙振动影响研究

梁明晖<sup>1</sup> 邹涛<sup>1</sup> 钱春宇<sup>2</sup> 张凯<sup>2</sup>

(1. 西安市轨道交通集团有限公司运营分公司, 710018, 西安;

2. 机械工业勘察设计院有限公司, 710043, 西安//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的:西安城墙是全国重点文物保护单位。日渐增强的路面交通振动和已开通运行的西安地铁2号线列车振动对西安城墙的安全性产生重要影响。因此,以西安永宁门城楼与城墙为研究对象,通过收集地铁不同运行速度对永宁门城楼与城墙造成振动的监测数据,分析其对永宁门城楼与城墙的影响。方法:监测得到现有路面交通引起的永宁门城楼与城墙重要控制点的振动响应;通过振动能量叠加计算方法,得出地铁不同运行速度+路面交通综合工况下的最大振动速度幅值并分析其影响规律;依据GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》容许的振动标准,分析、判定古建筑在各工况下的振动响应速度幅值是否满足相关要求。结果及结论:永宁门城墙本体结构及城楼木结构在单独路面交通工况、地铁运行+路面交通综合工况下,振动响应速度幅值均满足GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》容许振动标准要求和国家文物局建议值;对地铁运行+路面交通综合工况而言,降低地铁运行速度,永宁门城墙与城楼以及裂缝处各监测点的振动速度响应幅值变化程度均较小,故地铁降速对其影响有限;振动监测和叠加计算结果表明,路面交通对永宁门城墙的振动影响比地铁运营带来的振动影响大。

**关键词** 城市轨道交通;振动监测;西安古城墙;动力响应;振动评估

**中图分类号** TB533+.2;X827

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.07.017

## Influence of Urban Rail Transit on Xi'an Yongning Gate Ancient City Wall Vibration

LIANG Minghui, ZOU Tao, QIAN Chunyu, ZHANG Kai

**Abstract** Objective: Xi'an ancient city wall is a major historical and cultural site protected at the national level in China. The increasing vibration of road traffic and the operating Xi'an Metro Line 2 train has significant influence on the safety of Xi'an ancient city wall. Therefore, taking the Xi'an Yongning Gate (hereinafter represented by 'YG') tower and wall as research object, by collecting the monitoring data of different metro operating speeds causing vibration of YG tower and

wall, the influence of metro operating speed on YG tower and wall is analyzed. Method: The vibration response at important control points of YG tower and wall caused by existing road traffic is monitored. Through the calculation method of vibration energy superposition, the vibration peak velocity amplitude under different metro operating speeds + road traffic comprehensive working conditions is obtained, and its influence law is analyzed. According to the vibration standards in GB/T 50452—2008 Technical Specifications for Protection of Historic Buildings against Man-made Vibration, analysis and judgement is conducted on whether the vibration response velocity amplitude of ancient buildings under various working conditions can meet the relevant requirements. Result & Conclusion: The vibration response velocity amplitude of YG wall main structure and tower wooden structure under road traffic condition and metro + road traffic comprehensive conditions meet the allowed vibration standard requirements in GB/T 50452—2008 and the recommended value by National Cultural Heritage Administration; for the metro + road traffic comprehensive conditions, when metro operating speed is lowered, and the change of vibration velocity response amplitude at monitoring points on YG wall, tower and cracks is small, thus metro speed reduction has limited impact; the results of both vibration monitoring and superposition calculation show that the impact of road traffic on YG wall vibration is greater than that of metro.

**Key words** urban rail transit; vibration monitoring; Xi'an ancient city wall; dynamics response; vibration assessment

**First-author's address** Operation Branch of Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710018, Xi'an, China

城市轨道交通列车运行频繁,对周边建筑物将产生一定的振动影响。由于城市轨道交通的客运量大、持续时间长等特性,其所造成的振动是长期存在的。长此以往,其将对附近的古建筑物等造成损害,甚至损伤<sup>[1]</sup>。因此,对城市轨道交通旁的古

建筑物状态的监测问题亟待解决。

西安古城墙作为全国的重点文物保护单位,是中国古代遗产中原貌最完整、现存规模最大的历史文化遗产<sup>[2]</sup>。由于自然、历史和人为等因素的影响,西安古代城垣已严重受损。因此,西安古城墙的保护工作十分重要。西安作为我国西部重点城市,经济发展迅速,城市交通量日益增长,古建筑受交通引起的振动影响也日益严重,西安古城墙结构长期安全性受到了严峻的挑战。

本文以西安永宁门的城楼与城墙为研究对象,对路面交通和西安地铁2号线(以下简称“2号线”)列车在不同运行速度下产生振动引起的永宁门城楼与城墙的动力响应进行分析和研究,并对路面交通和地铁运行车辆引起振动叠加时的永宁门城楼与城墙所受振动影响进行综合评估,为西安古城墙的长期保护工作提供数据支撑。

## 1 西安永宁门古城墙

### 1.1 建筑特点

西安古城墙是明初以唐皇城为基础向北、向东扩建而成,自建成至今已有600多年。西安古城墙为长方形,共有18座城门,全长为13.74 km。其中,以安远门、永宁门、长乐门、安定门最为特别,是原西安古城墙的主城门。西安古城墙高为12 m,墙顶宽为12~14 m,墙底宽为15~18 m。

### 1.2 建筑结构

西安古城墙建筑材料主要由黄土、石灰、糯米汁和青砖等组成,形成了“砖表土芯”结构。城墙顶部每长40~60 m处设置一道青砖排水水槽,能有效防止了雨水浸泡。

### 1.3 2号线与永宁门古城墙的关系

2号线于2011年9月16日投入运营,线路全长为20.5 km,共设置车站17座。其运行区域包含永宁门区段,区段起点为YCK14+200,终点为YCK14+350,共计150 m,地铁上下行分别经永宁门瓮城两侧城墙门下绕行而过。其绕行线路半径为350 m。该区段绕行线路地下隧道顶约有17.4~18.5 m的埋深,往前下穿护城河。2号线与永宁门古城墙的平面位置关系示意图如图1所示。

### 1.4 永宁门古城墙的现状

西安古城墙因年代久远、本体薄弱、人为因素及自然侵蚀等因素的影响,一直存在裂缝、风化及不

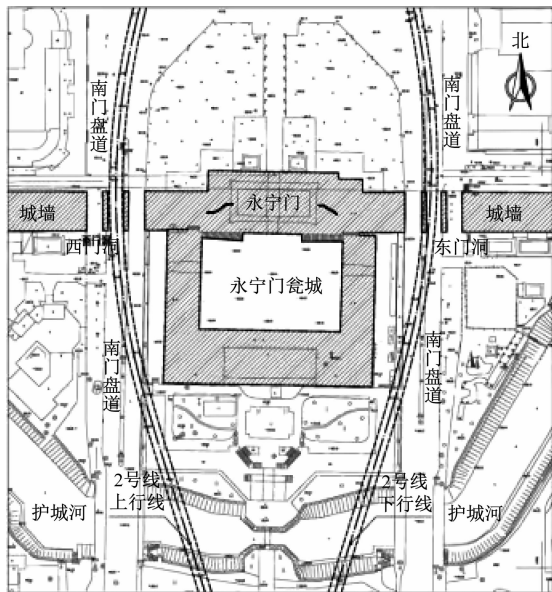


图1 2号线与永宁门古城墙平面位置示意图

Fig. 1 Planar relation diagram of Line 2 and Yongning Gate wall

均匀沉降等病害问题。2018年1月,在永宁门城楼东西两侧海墁上新增了2条长裂缝XF1和DF1(如图2—图3所示)。地铁运行时产生的振动,被认为是影响城墙安全的因素之一。为进一步确定地铁运行速度对城墙振动响应的影响程度,特开展此项振动影响的专项研究工作。



图2 城楼西侧海墁裂缝(镜头向东)

Fig. 2 Cracks on tower west side paving (camera to the east)



图3 城楼东侧海墁裂缝(镜头向西)

Fig. 3 Cracks on tower east side paving (camera to the west)

## 2 路面交通对永宁门古城墙振动响应监测

### 2.1 测量参数

质点振动测量参数包括 3 种运动量,分别由位移、速度和加速度通过微积分得出运动量。一般来说,振动频率较高时,采用加速度拾振器直接测量的加速度精度较高;在位移可能造成严重影响场合多用位移来描述振动大小;而路面交通振动为中低较宽频率范围时,用振动速度用来衡量振动的大小较为准确。

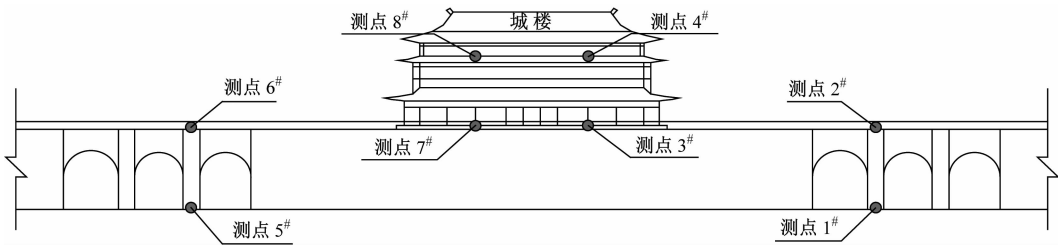


图 4 永宁门振动监测测点布置示意图

Fig. 4 Layout diagram of Yongning Gate vibration monitoring points

### 2.3 监测仪器及信号处理

现场振动监测使用的振动数据采集仪型号分别为 INV3060A 和 DH5910,采用 891-II 型和 941-B 型速度拾振器,拾振器参数详见表 1。监测仪器使用前均对其进行了检定,监测过程中仪器使用状态良好。

表 1 速度拾振器参数表

Tab.1 Speed pickup sensor parameters

型号	监测方向	量程/(m/s)	频率响应范围/Hz	数量/个
891-II	水平	1.40	0.50 ~ 100.00	4
891-II	竖直	1.40	0.50 ~ 100.00	2
941-B	水平	0.30	0.17 ~ 100.00	4
941-B	竖直	0.30	0.17 ~ 100.00	2

由于建筑物受路面交通振动的影响主要集中在低频振动且在 30 Hz 以下,而实际监测中以最低采样频率的 3~5 倍作为分析上限,故采样频率设为 128 Hz。每次采集 1.5 h,连续进行,并自动化存储数据。

现场监测信号经 DASP V10 软件去直流、消噪、滤波和去除趋势项等处理后直接得到速度时程曲线,再经 FFT(快速傅里叶变换)处理得到频谱曲线,从而统计各时段振动响应速度幅值。

### 2.2 测点布置

为了解城楼木结构中的振动传播规律、关键位置水平和竖直向的振动水平及路面交通振动在古城墙中的衰减规律,测点位置参照 GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》<sup>[3]</sup>的要求,结合监测现场条件和监测仪器情况,共布设 8 个测点,其中城墙本体和城楼木结构各 4 个,具体测点布置示意图见图 4。分别在水平方向、竖直方向测量其速度时程信号(方向以 X(水平向东)、Y(水平向北)、Z(竖直方向)表示)。

### 2.4 监测结果分析

统计得出不同工况下城墙本体及城楼木结构各方向的最大振动速度响应幅值如表 2 所示。典型时程与频谱曲线如图 5—图 6 所示<sup>[4]</sup>。监测数据表明:路面交通对城墙永宁门区域的振动影响比地铁运营带来的振动影响大<sup>[5]</sup>。

表 2 不同工况下永宁门城楼与城墙振动速度幅值统计表

Tab.2 Statistics of velocity amplitude of Yongning Gate wall and tower under different working conditions

工况	测点位置	最大振动速度幅值/(mm/s)			
		X 向	Y 向	Z 向	
路面交通	城墙	底部	0.064	0.048	0.062
		顶部	0.042	0.041	0.044
	城楼	一层	0.066	0.062	0.059
		二层	0.093	0.105	0.102
地铁运行	城墙	底部	0.035	0.033	0.035
		顶部	0.026	0.025	0.029
	城楼	一层	0.051	0.055	0.041
		二层	0.081	0.083	0.047

## 3 地铁列车不同运行速度下永宁门城墙振动响应

### 3.1 工况设置

为研究地铁列车不同运行速度对永宁门城墙

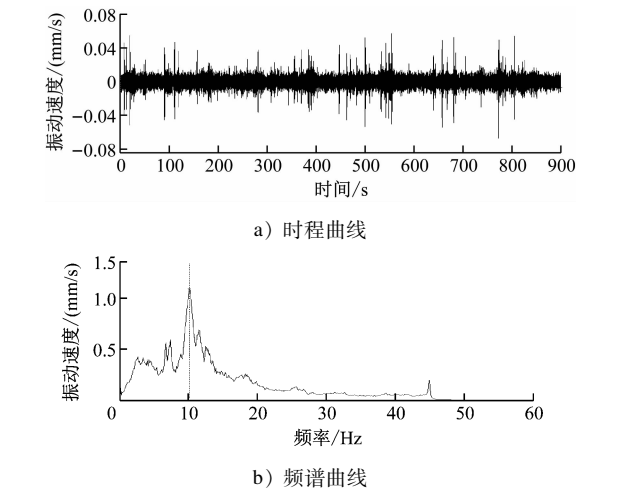


图5 路面交通工况下典型振动速度时程与频谱曲线截图  
Fig.5 Screenshot of typical time-history and spectrum curve under road traffic conditions

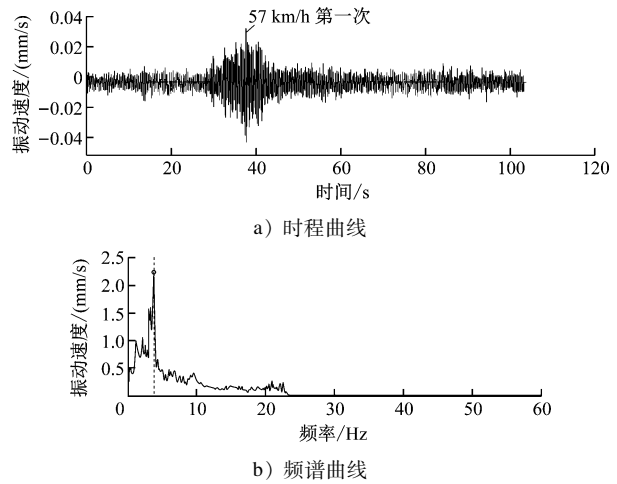


图6 地铁运行工况下典型振动速度时程与频谱曲线截图  
Fig.6 Screenshot of typical time-history and spectrum curve under metro operating conditions

及裂缝处的振动影响程度,选取北京时间00:30—04:00期间(路面交通最稀少时)在上下行线各调度一辆电客车,以57 km/h、55 km/h、50 km/h、45 km/h和40 km/h等5种速度匀速通过永宁门区段,每工况往返共通过6次。具体监测工况见表3。

表3 振动监测工况布置

Tab.3 Layout of vibration monitoring conditions

测试对象	测点数量/个	测试工况
城楼	4	57 km/h 双线交汇
城墙	4	55 km/h 双线交汇
城楼东侧裂缝	1	50 km/h 双线交汇
城楼西侧裂缝	1	45 km/h 双线交汇 40 km/h 双线交汇

3.2 监测结果

根据相关数据,分析了各测点现场实测信号的时程和频谱曲线图。在图4的基础上,增加了2处测点(见图7)。表4为各工况下永宁门城楼与城墙最大振动速度幅值统计表<sup>[6]</sup>。

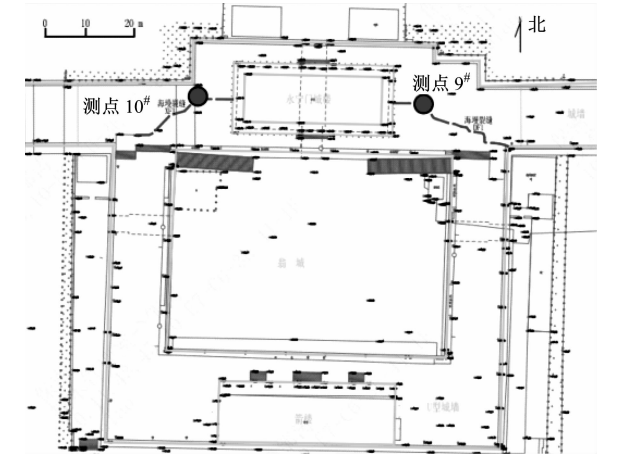


图7 永宁门振动监测海漫裂缝处测点布置示意图  
Fig.7 Layout diagram of paving crack measurement points under Yongning Gate vibration monitoring

表4 各工况下永宁门城楼与城墙最大振动速度幅值统计表  
Tab.4 Statistics of Yongning Gate wall and tower maximum vibration velocity amplitude under various working conditions

工况	位置	最大振动速度幅值/( mm/s)		
		X 向	Y 向	Z 向
57 km/h 双线交汇	城墙	0.035	0.029	0.035
	城楼	0.067	0.083	0.047
	海漫裂缝处	0.023	0.024	0.028
55 km/h 双线交汇	城墙	0.034	0.026	0.031
	城楼	0.057	0.052	0.038
	海漫裂缝处	0.021	0.021	0.026
50 km/h 双线交汇	城墙	0.033	0.022	0.028
	城楼	0.046	0.035	0.034
	海漫裂缝处	0.017	0.018	0.025
45 km/h 双线交汇	城墙	0.031	0.018	0.027
	城楼	0.039	0.041	0.030
	海漫裂缝处	0.016	0.016	0.023
40 km/h 双线交汇	城墙	0.031	0.020	0.027
	城楼	0.043	0.047	0.024
	海漫裂缝处	0.016	0.016	0.021

由表4可见:降低地铁运行速度,各监测点的振动速度响应幅值均有不同程度的减弱,其中地铁运

行速度由 57 km/h 降至 50 km/h,各监测点振动响应降低程度较为显著,但进一步下降至 40 km/h,各监测点的振动响应降幅较小。

4 振动叠加计算

4.1 振动能量叠加计算

对西安永宁门古城墙的振动影响主要是路面交通和地铁运行综合产生,为了研究地铁不同运行速度产生的振动和路面交通振动叠加后对城墙的影响规律,采用实际监测 + 振动叠加理论分析方法解决,具体步骤及方法如下。

步骤 1:在无路面交通情况下,按地铁列车不同运行速度通过现场监测得到永宁门城楼、城墙及裂缝处的振动速度峰值  $V_{peak,m}$  和有效值  $V_{rms,m}$ 。

步骤 2:现场监测得到地铁停运后路面交通单独工况下引起的永宁门城墙、城楼及裂缝处的振动速度峰值  $V_{peak,r}$  和有效值  $V_{rms,r}$ 。

步骤 3:取地铁列车不同运行速度及地铁停运后路面交通单独工况下引起永宁门城楼、城墙及裂缝处的振动速度有效值  $V_{rms,total}$ ,在叠加情况下计算各测点在地铁 + 路面交通工况下振动速度的峰值  $V_{peak,total}$ ,计算公式为:

$$V_{rms,total} = \sqrt{V_{rms,m}^2 + V_{rms,r}^2} \tag{1}$$

步骤 4:取上述得出的地铁 + 路面交通振动速度有效值,配合波峰因数  $C_f$ ,计算得到各测点在地铁 + 路面交通工况下振动速度的峰值,计算公式为:

$$V_{peak,total} = C_f V_{rms,total} \tag{2}$$

步骤 5:由步骤 1—步骤 4 得到地铁列车实际运行速度下,地铁振动和路面交通振动的叠加速度峰值,与实际的地铁运行 + 路面交通综合工况下的实测值进行对比分析,调整  $C_f$ 、层间放大系数等参数,使得不同振动源叠加计算模型参数趋于合理。

步骤 6:按照步骤 5 得到的计算参数分别计算地铁列车不同运行速度下的振动速度值和路面交通振动速度值的叠加结果,得到地铁列车运行速度对城墙影响区域带来的振动影响规律。

4.2 叠加计算结果分析

根据振动叠加原理,不同地铁列车运行速度下综合工况的叠加计算结果会进一步降低地铁运行振动的影响程度。表 5 为永宁门城楼与城墙叠加计算的最大振动速度幅值统计表<sup>[6]</sup>。

表 5 永宁门城楼及城墙叠加计算的最大振动速度幅值统计表

Tab.5 Statistics of Yongning Gate wall and tower maximum vibration velocity amplitude by superposition calculation

工况	测点位置	最大振动速度幅值/(mm/s)		
		X 向	Y 向	Z 向
57 km/h 双线交汇	城墙	0.075	0.092	0.094
	城楼	0.102	0.125	0.107
	海漫裂缝处	0.045	0.069	0.071
55 km/h 双线交汇	城墙	0.075	0.092	0.094
	城楼	0.097	0.125	0.107
	海漫裂缝处	0.045	0.069	0.071
50 km/h 双线交汇	城墙	0.070	0.086	0.089
	城楼	0.097	0.114	0.102
	海漫裂缝处	0.042	0.064	0.066
45 km/h 双线交汇	城墙	0.070	0.086	0.085
	城楼	0.097	0.114	0.102
	海漫裂缝处	0.042	0.064	0.066
40 km/h 双线交汇	城墙	0.070	0.086	0.085
	城楼	0.097	0.114	0.102
	海漫裂缝处	0.042	0.064	0.066

各工况叠加计算结果表明:地铁列车运行速度由 57 km/h 降至 55 km/h 时,各测点振动响应降低程度介于 0 ~ 6.5% 之间;地铁列车运行速度由 57 km/h 分别降至 50 km/h、45 km/h、40 km/h 时,各测点振动响应降低程度均介于 0 ~ 13.0% 之间。因此地铁降速对各测点振动响应的影响有限。

4.3 路面交通与地铁运行对永宁门古城墙的振动影响程度分析

为了更加清晰地分析地铁运行与路面交通振动对城墙本体的影响程度,将地铁运行速度为 57 km/h 时各监测对象的监测结果与地铁停运后路面交通工况下及综合工况下的速度幅值进行对比分析,各工况下振动响应幅值对比(水平方向)如图 8 所示,各工况下振动响应幅值对比(竖直方向)图 9 所示<sup>[5]</sup>。从图 8 及图 9 可以看出:①地铁单独运行引起上部古建筑(城墙和城楼)的振动响应幅值(水平向和竖向)均小于路面交通引起的振动量;②路面交通工况下的振动响应速度幅值接近综合工况下的振动水平,地铁振动量对其贡献较小。

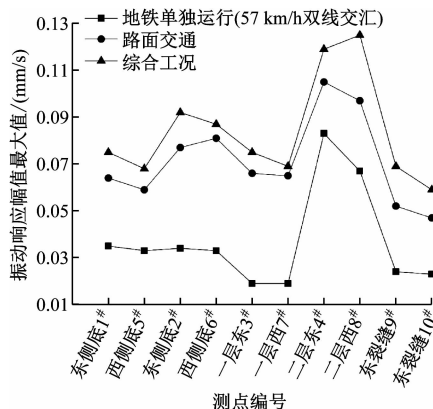


图8 各工况下振动响应幅值对比(水平方向)

Fig. 8 Comparison of vibration response amplitude under different working conditions (horizontal)

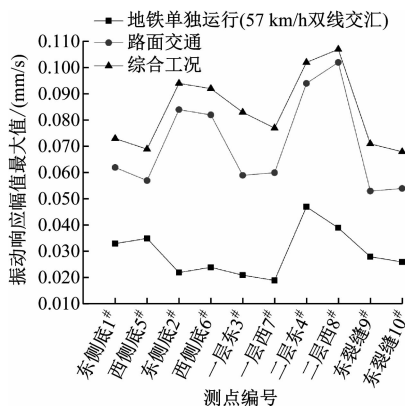


图9 各工况下振动响应幅值对比(竖直方向)

Fig. 9 Comparison of vibration response amplitude under different working conditions (vertical)

## 5 城墙的交通振动响应综合评估

建筑物振动评估涉及到车辆动力学、土动力学、轨道动力学、车辆-交通结构-场地土动力相互作用、土-结构动力相互作用及振动信号的处理等众多研究领域,是一个不确定性很强且非常复杂的问题,欲制定统一的评估标准存在许多困难。

### 5.1 容许振动标准

对比分析各国建筑物振动容许标准<sup>[6-7]</sup>,目前国际上同类标准(振动速度)中最严格的是我国的GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》。故本文以该标准作为评估标准,在符合建筑物结构类型的前提下能够更好地保护古建筑的安全。通过弹性波波速测试得到永宁门城墙本体结构容许振动标准(水平方向)为0.15 mm/s;城楼木结构容许振动标准(水平方向)为0.19 mm/s;竖直方向容许振动标准均采用国家文物局建议值为0.20

mm/s。

### 5.2 城墙本体结构振动评估

1) 路面交通工况下,城墙本体结构水平向振动速度幅值为0.064 mm/s,竖直向振动速度幅值为0.062 mm/s,均满足国家标准及国家文物局要求。

2) 地铁+路面交通综合工况下,城墙本体结构水平向振动速度幅值为0.092 mm/s,竖直向振动速度幅值为0.094 mm/s,均满足国家标准及国家文物局要求。

### 5.3 城楼木结构振动评估

1) 路面交通工况下,城楼木结构水平向振动速度幅值为0.105 mm/s,竖向振动速度幅值为0.102 mm/s,均满足国家标准及国家文物局要求。

2) 地铁+路面交通综合工况下,城楼木结构水平向振动速度幅值为0.125 mm/s,竖向振动速度幅值为0.107 mm/s,均满足国家标准及国家文物局要求。

## 6 结语

本文在现场监测的基础上,通过振动能量叠加计算的方法,研究了路面交通与不同运行速度的地铁列车对永宁门城墙的振动影响,并依据国家标准对地铁+路面交通振动叠加对城墙的影响进行了综合评估。主要得到以下结论:

1) 城墙本体结构及城楼木结构在不同速度的地铁+路面交通综合工况下,振动响应速度幅值均满足GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》容许的振动标准要求和国家文物局建议值;

2) 对地铁+路面交通综合工况而言,降低地铁运行速度对永宁门城楼、城墙及裂缝处各监测点的振动速度响应幅值变化程度的影响均较小,地铁降速对其影响有限;

3) 振动监测和叠加计算结果表明,路面交通对永宁门城墙的振动影响比地铁运营带来的振动影响大;

4) 西安地铁运营公司将继续执行对永宁门古城墙区域的加密变形监测、城墙本体自动化沉降变形监测,以及城墙、城楼的长期振动监测工作,加强对监测数据的分析,以确保其安全。

## 参考文献

- [1] 孟昭博. 西安钟楼的交通振动响应分析及评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

MENG Zhaobo. Analysis and assessment of the vibration responds traffic-induced of Xi'an bell tower[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.

- [2] 俞茂宏,张学彬,方东平. 西安古城墙研究: 建筑结构和抗震[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.

YU Maohong, ZHANG Xuebin, FANG Dongping. Research on Xi'an ancient city wall: building structure and earthquake resistance[M]. Xi'an: X'an Jiaotong University Press, 1994.

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 古建筑防工业振动技术规范: GB/T 50452—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

- [4] 机械工业勘察设计院有限公司. 西安地铁穿越或绕行全国重点文物保护单位振动及沉降监测项目[R]. 西安: 机械工业勘察设计院有限公司, 2016.

China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd. Vibration and settlement monitoring project of Xi'an Metro crossing or detouring around major historical and cultural site protected at the national level in China[R]. Xi'an: China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., 2016.

- [5] 机械工业勘察设计院有限公司. 地铁二号线运行速度对

西安城墙永宁门区域振动影响专项研究[R]. 西安: 机械工业勘察设计院有限公司, 2019.

China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd. Special research on the impact of Metro Line 2 operating speed on the vibration of Xi'an Yongning Gate area City Wall[R]. Xi'an: China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., 2019.

- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机械振动与冲击 建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南: GB/T 14124—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Mechanical vibration and shock-vibration of buildings-guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings: GB/T 14124—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 机械工业环境保护设计规范: GB 50894—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of environment protection for machinery industry: GB 50894—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

(收稿日期: 2021-01-22)

## (上接第 91 页)

和主动支付时间间隔较长, 同时在进出站时均生成了人脸识别支付交易数据时也不能绝对杜绝重复计费问题的发生, 后续将继续完善方案, 争取杜绝此类问题的发生, 同时也不会造成地铁票务损失。

## 参考文献

- [1] 孙飞. 地铁 AFC 系统人脸识别检测技术的现状及应用[J]. 中国科技纵横, 2020(12): 55.

SUN Fei. The present situation and application of face recognition detection technology in metro AFC system[J]. China Science & Technology Overview, 2020(12): 55.

- [2] 姜海. 基于人脸识别技术实现地铁 AFC 闸机无感通行的应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(11): 59.

JIANG Hai. Research on the application of face recognition technology to realize non-inductive traffic of AFC gate in subway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(11): 59.

- [3] 张振杰. 人脸识别技术在济南轨道交通 AFC 系统中的应用

[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊 1): 239.

ZHANG Zhenjie. Application of face recognition technology in AFC system of Ji'nan rail transit[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 239.

- [4] 蔡佳妮. “互联网+”时代城市轨道交通自动售检票系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 192.

CAI Jiani. Design of urban rail transit automated fare collection system in Internet + era[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3): 192.

- [5] 王大彬. 基于二维码支付的地铁自动售检票系统[J]. 科技视界, 2020(11): 1.

WANG Dabin. Automatic fare collection system of subway based on two-dimensional code payment[J]. Science & Technology Vision, 2020(11): 1.

- [6] 邱华瑞, 张宁, 徐文, 等. 城轨交通自动售检票系统架构体系研究[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(2): 86.

QIU Huarui, ZHANG Ning, XU Wen, et al. Research of architecture on rail transit's AFC system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(2): 86.

(收稿日期: 2021-02-21)