

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.143



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 复杂交通环境激励下西安城墙模态参数识别与分析

夏倩<sup>1</sup>, 沈淳珂<sup>1</sup>, 李建爽<sup>2</sup>, 吴婧姝<sup>2</sup>, 毛宁<sup>3</sup>, 孙源清<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088;  
3. 启迪设计集团股份有限公司西安分公司, 西安 710061)

**摘要:**结构的模态参数识别一直是结构健康监测的基础和重点,其能评估结构状态、识别结构损伤,对结构的后续维护具有重要意义,对古建筑结构亦是如此。西安城墙属于中国第一批重点文物保护单位,其模态参数识别更是需要重视。在西安城墙瓮城处城墙布设速度与加速度动力特性监测系统,通过现场动力测试试验,获取复杂交通环境激励下城墙振动响应数据;通过特征系统实现算法(ERA)、随机子空间法(SSD)和峰值法(PP)3种模态识别方法相结合,对响应数据进行结构模态参数识别,获取该区域城墙模态参数;结合城墙数值有限元模型,对比3种方法所得的模态参数,建立有效的结构动力模型。结果表明:3种方法均可以在环境激励下有效识别结构的模态频率并最终得出振型,验证了该3种模态识别方法对古城墙模态参数识别的可行性。

**关键词:**古城墙;交通振动;模态识别方法;模态参数

**中图分类号:** TU362 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0174-10

## Modal parameter identification and analysis of Xi'an City Wall under complex traffic environment

XIA Qian<sup>1</sup>, SHEN Chunke<sup>1</sup>, LI Jianshuang<sup>2</sup>, WU Jingshu<sup>2</sup>, MAO Ning<sup>3</sup>, SUN Yuanqing<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China;  
2. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC, Beijing 100088, P. R. China;  
3. Qidi Design Group Co., Ltd., Xi'an Branch, Xi'an 710061, P. R. China)

**Abstract:** Structural modal parameter identification is generally the foundation and emphasis of structural health monitoring. It can evaluate the structural state and identify structural damage, which is of great significance to the subsequent maintenance of the structure, as well as the ancient building structure. Xi'an city wall belongs to the first batch of key cultural relic protection units in China, and its modal parameter identification needs more attention. Based on the monitoring system of velocity and acceleration dynamic characteristics of the wall at the Wengcheng of Xi'an urban wall, the vibration response data of the urban

**收稿日期:** 2021-03-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(51708450、51778527); 中国博士后科学基金(2018M643702); 陕西省博士后科研项目(2018BSHEDZZ22); 陕西省自然科学基金项目(2018JQ5169)

**作者简介:** 夏倩(1982-), 女, 博士, 主要从事既有建筑物的振动分析与隔振研究, E-mail: ice69pipiniu@163.com.

**Received:** 2021-03-14

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51708450, 51778527); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M643702); Shaanxi Provincial Postdoctoral Foundation (No. 2018BSHEDZZ22); Shaanxi Provincial Natural Science Foundation (No. 2018JQ5169)

**Author brief:** XIA Qian (1982-), PhD, main research interests: vibration analysis and vibration isolation of existing buildings, E-mail: ice69pipiniu@163.com.

wall under the excitation of complex traffic environment were obtained through the field dynamic test. The structural modal parameters of the response data were identified by the combination of the three modal identification methods of the feature system realization algorithm (ERA), the random subspace method (SSI) and the peak value method (PP) to obtain the modal parameters of the urban wall in the region. Combined with the numerical finite element model, the modal parameters obtained by the three methods were compared to establish an effective structural dynamic model. The results show that these three methods can effectively identify the modal frequency of the structure under environmental excitation and finally obtain the vibration mode, which verifies the feasibility of the three modal identification methods for the modal parameter identification of the ancient city wall.

**Keywords:** ancient city wall; traffic vibration; modal identification method; modal parameter

随着社会的发展,西安城墙结构受复杂交通振动影响程度大大加深,其抗震性能正遭受严峻挑战,通过常规加固及简单修复无法保证结构安全,为及时发现、评估城墙损伤并对其加以维护,需重视其健康监测。健康监测已经逐渐成为一个热门研究方向,单德山等<sup>[1]</sup>通过对桥梁健康监测系统研究现状进行详细介绍、总结和评述,最终发现模式识别技术越来越广泛地应用于桥梁监测。作为健康监测的重点和基础,模态参数识别对结构的状态评估及损伤识别具有重要意义。现有学者从古建筑的动力特性层面出发,对古建筑结构展开系统研究,利用不同模态识别方法获取结构模态参数(频率、振型和阻尼比),从而对结构状态、安全性进行评估,并取得了一定成果。俞茂宏等<sup>[2]</sup>通过现场脉动测试和两种模型的多点稳态共振试验,分析了某箭楼的振动特性及其影响因素;卢俊龙等<sup>[3]</sup>研究了崇寿寺的宋代古塔,通过峰值法(PP)得到了该塔结构模态参数,建立有限元模型对计算结果进行校核,分析得到结构等效弹性模量,提出了模态刚度的损伤判别指标;高延安等<sup>[4]</sup>基于随机减量技术,采用随机子空间法对古建筑木构飞云楼进行了模态参数识别,得到该楼的模态参数,验证了该方法能够有效消除信号噪声影响;乔冠东<sup>[5]</sup>采用ITD法和STD法识别出某古楼的模态参数,通过结构动力分析模型的建立与动力响应的计算,对其安全性进行了评估。

以上针对古建筑模态参数的研究多集中在古塔等高耸结构形式中,而古城墙作为一种由土层与古砌体组成的复合材料的特殊结构,其平面尺寸远大于高度尺寸,现有的传统模态参数识别方法在该结构形式的古建筑中鲜有应用。此外,城墙附近交通流量大,受噪声影响严重,现场动力测试时所采集的信号不能满足平稳、线性的要求,因此,除计算速度较快的峰值法(PP)外,能够有效消除信号数据噪声

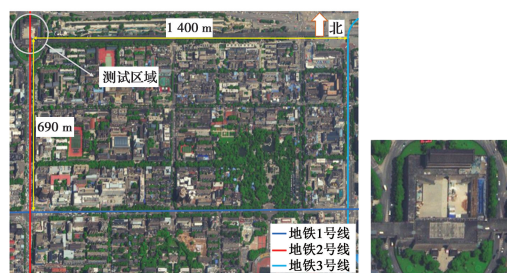
影响的特征系统实现算法(ERA)和随机子空间算法(SSSI)同样未在西安城墙结构中加以应用。

综上所述,关于古城墙结构的动力特性研究鲜有涉及。笔者以西安城墙安远门某瓮城为研究对象,通过现场动力测试,分析环境振动影响下城墙的动力响应,运用峰值法(PP)、特征系统实现算法(ERA)、随机子空间法(SSSI)3种算法<sup>[6-9]</sup>进行结构模态参数识别,最终通过有限元数值模型对试验识别值进行验证,并对该城墙模态进行对比研究。

## 1 城墙的现场动力测试

### 1.1 城墙附近交通情况

西安城墙瓮城区域位于交通枢纽处,车流量大,测试区域及附近交通布局见图1。地铁2号线下穿城墙,地铁1号线距离城墙测试区域690 m,地铁4号线距离城墙测试区域1 400 m。



(a) 测试区域附近交通布局 (b) 测试区域

图1 城墙卫星图

Fig. 1 Satellite map of city wall

### 1.2 测试方法与参数

将环境(车辆、风荷载、地脉动和人为活动等)激励作为一种自然激励,利用动力响应完成结构模态参数识别的工作模态分析方法获取城墙正常情况下的模态参数。

根据古建筑的控制标准及相关研究<sup>[10-11]</sup>,试验分别测取所布置激励测点和响应测点水平、竖向的

加速度值与振动速度值。

### 1.3 测点安排与布置

试验共布置 32 个监测点(考虑复杂交通的影响对城墙门洞结构同样有效,故在两侧门洞也布置了测点),详细布置见图 2。每个测点均测取水平、竖向的速度时程,测点 4、测点 22 为瓮城整体区域的中心位置,故选为结构的激励测点,需同时采集其水平、竖向的加速度响应。

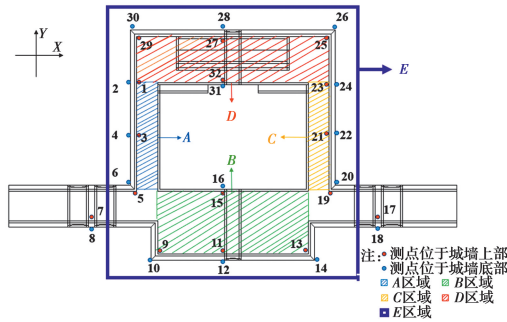
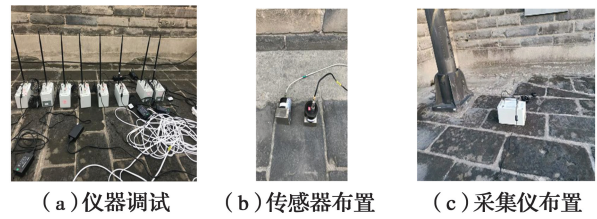


图 2 测点布置平面

Fig. 2 Layout plane of measuring points

城墙动力测试共有 5 组,具体分组情况见表 1。5 组区域分别对应 A~E 分区,如图 2 所示。因测试设备有限且古城墙测试范围广,故采用有线与无线两种采集器共同测试的方式,采集设备采用 INV9580A 无线采集仪、INV3018CT 型 24 位高精度数据采集仪和 941B 型超低频测振仪(见表 1 注),设备在试验前经过严格校准,以保证试验数据准确。考虑到采集仪需进行校核,故设置参考点(参考点设置在 A、C 两组,见表 1),古城墙的现场测试照片如图 3 所示。



(a) 仪器调试 (b) 传感器布置 (c) 采集仪布置

图 3 现场测试图

Fig. 3 Field test diagram

表 1 各组对应测点布置表

Table 1 Layout table of corresponding measuring points for each group

测试区域	采集仪	测点号	测试方向	测试参数	参考点
A	无线	1、2、3、4、5、6	X、Z	速度	5、6
	有线	4(激励)	X、Y、Z	加速度	
B	无线	5、6、13、14、15、16、19、20	Y、Z	速度	
	有线	9、10、11、12			
C	无线	19、20、21、22、23、24	X、Z	速度	19、20
	有线	22(激励)	X、Y、Z	加速度	
D	无线	1、2、23、24、29、30、31、32	Y、Z	速度	
	有线	25、26、27、28、			
E	无线	9、10、13、14、25、26、29、30	Y、Z	速度	
门洞	无线	7、8、17、18	Y、Z	速度	

注:1)INV9580A 无线采集仪和 INV3018CT 型 24 位高精度采集仪的最高采样频率分别为 256 Hz 和 102.4 kHz;941B 型超低频测振仪可直接与各种记录器及数据采集系统配接;2)门洞区域的测点 7、8 属于 A 区域;测点 17、18 属于 C 区域。

### 1.4 采样频率

为避免混淆和失真,采集后的离散信号在采样、量化、时域截断等方面需遵循 Shannon 采样定理<sup>[12]</sup>,以保持原信号的主要特征:采样频率  $f_s \geq 2f_{max}$  ( $f_{max}$  为分析信号的最高频率),采样频率在实际测试中一般取最高频率的 2~4 倍。

在复杂交通影响因素中,地下铁路与路面交通是影响城墙的最主要因素,刘维宁等<sup>[13]</sup>和夏禾<sup>[14]</sup>研究表明:路面交通对建筑物的影响多集中在 0~40 Hz 范围内,而对地下铁路的影响则集中在 30~80 Hz 之间。通过计算,将 256 Hz 作为试验的采样

频率。

### 1.5 试验所得数据

由于试验数据量庞大,从各个测点中选取 60 s 的振动响应曲线(地铁交通与地面交通同时作用),通过傅里叶变换得到频谱曲线,表 2 为 A 区域测点 3 位置处的时程曲线和频谱曲线。

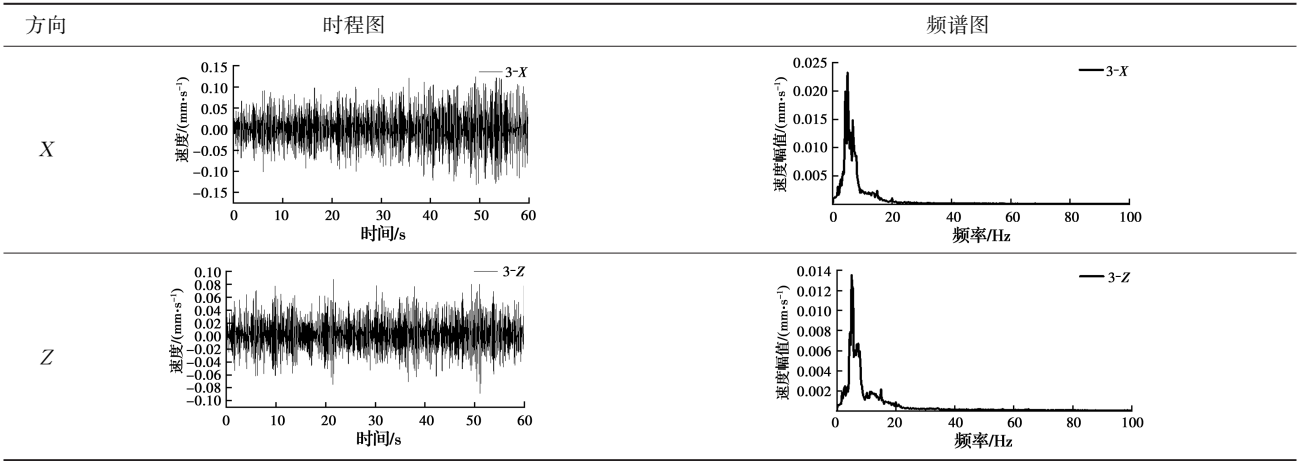
从测点时程曲线图中可以得出,各测点的振动速度幅值范围集中在 0.06~0.1 mm/s 之间;通过频谱曲线图可以看出,在地下铁路与路面交通影响下,城墙的振动响应范围集中在 0~20 Hz 之间。王

田友<sup>[15]</sup>、贾颖绚等<sup>[16]</sup>研究表明:地下铁路对建筑物的影响多集中在 30 Hz 以上,且距离隧道中心线越大,影响越小,在距隧道中心线 20~40 m 范围内存

在一个放大区,在 40~60 m 的范围内衰减幅度较大,超过这个范围后,衰减幅度减小,趋于平缓。可见城墙受路面车辆振动影响大于受地铁振动影响。

表 2 测点 3 的时程曲线和频谱图

Table 2 Time-history curve and spectrum diagram of measuring point 3



## 2 模态参数分析

### 2.1 数据预处理

动力测试所得城墙振动响应范围主要集中在 20 Hz 以内,由于数据量庞大,为便于分析,需对测试信号进行重采样<sup>[17]</sup>。为满足时频域分析,将重采样频率定为 51.2 Hz。图 4 为测点 1 重采样前后对比图。

由于试验基于环境激励,现场交通流量大,测试数据难免会受到外界不确定信号干扰,为保证信号真实性,通过去直流、平滑处理、去趋势项<sup>[18]</sup>一系列数据预处理操作,剔除噪声干扰,保证试验信号信噪比。

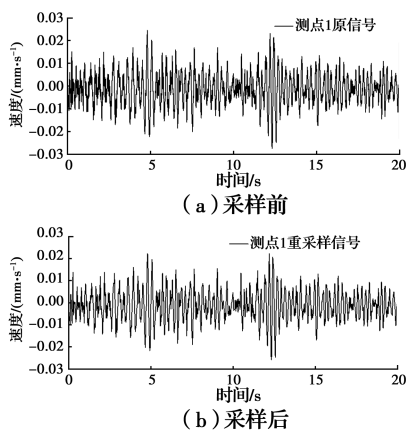


图 4 测点 1 重采样对比

Fig. 4 Resampling comparison of measurement point 1

### 2.2 模态计算

2.2.1 模态参数拟合 在所有测点中,选择具有代表性的振动响应,对城墙模态参数分别通过 PP 法、

ERA 法和 SSI 法进行拟合。其中,使用 PP 法时,利用 MATLAB 编程计算得到的 E 区域速度响应平均正则化功率谱如图 5 所示,选取并识别功率谱中的峰值,得到特征频率;使用 ERA 法和 SSI 法时,在确定系统阶次时存在问题,故通过稳定图法识别模态参数,分析各区域稳定图,得到特征频率,ERA 与 SSI 法计算所得 E 区域稳定图如图 6、图 7 所示。

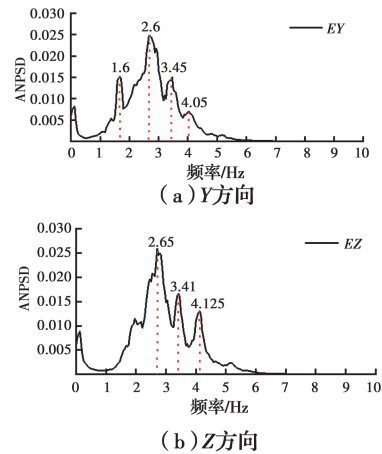


图 5 E 区域平均正则化功率

Fig. 5 Average regularization power of Area E

2.2.2 结果对比分析 3 种计算方法所得 A 区域特征频率及对比见表 3 和图 8。以 SSI 法计算结果作为参考,分析 3 种方法计算结果,并剔除其中虚假模态和误差较大的特征频率,将 3 种方法计算所得频率的算数平均值作为城墙瓮城区域的特征频率值,如表 4 所示。城墙横向和竖向两个方向的识别值相近,计算所得各区域特征频率范围主要集中于 2~7 Hz。

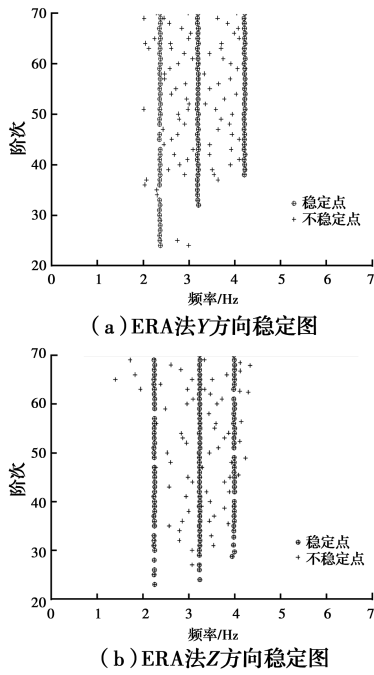


图6 ERA算法下E区域稳定图

Fig. 6 The stability diagram of Area E under ERA algorithm

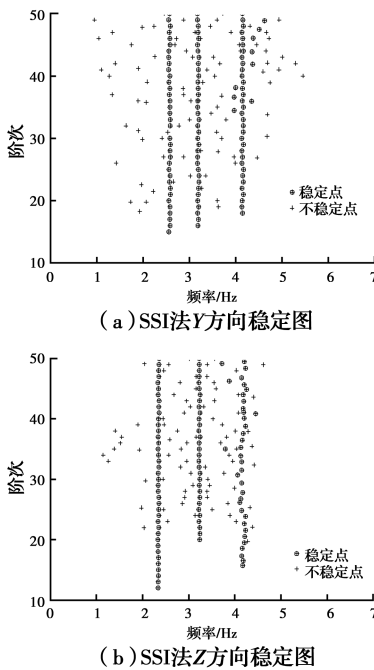


图7 SSI算法下E区域稳定图

Fig. 7 The stability diagram of Area E under SSI algorithm

A~D区域共有4阶频率被识别出,4个区域中,第1、2阶频率较为接近,范围分别集中在2.2~2.4 Hz之间和3.2~3.4 Hz之间;第3、4阶误差大于前两阶。4个区域中第3阶特征频率分别集中在4.1、4.9、4.0、4.7 Hz附近,可以看出,A区域与C区域较为接近,而B区域则与D区域较为接近;第4阶则集中在5.4、6.2、5.0、5.5 Hz附近。城墙瓮城整体区域(E区域)共有3阶频率被识别出,分别集中在2.6、3.4、4.2 Hz附近。

表3 3种算法下A区域的特征频率表  
Table 3 Characteristic frequency table for Area A under three algorithms

方向	算法	频率/Hz			
		第1阶	第2阶	第3阶	第4阶
X	PP	2.25	3.10	3.85	5.20
	ERA	2.25	3.24	3.40	5.48
	SSI	2.57	3.19	4.15	5.49
Z	PP	2.30	3.10	4.15	5.15
	ERA	2.37	3.19	4.21	5.46
	SSI	2.34	3.24	4.13	5.47

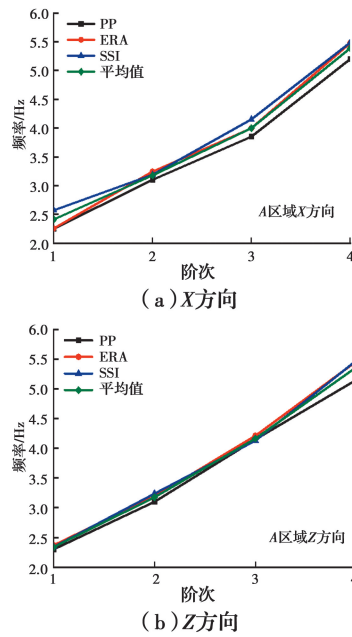


图8 A区域特征频率比较曲线

Fig. 8 Characteristic frequency comparison curve of Area A

表4 结构特征频率值  
Table 4 Structure characteristic frequency values

阶数	区域A		区域B		区域C		区域D		区域E	
	X向	Z向	X向	Z向	X向	Z向	X向	Z向	X向	Z向
第1阶	2.41	2.34	2.42	2.27	2.24	2.45	2.32	2.21	2.58	2.59
第2阶	3.18	3.18	3.44	3.41	3.34	3.38	3.36	3.40	3.44	3.40
第3阶	4.00	4.16	4.93	4.74	3.83	4.10	4.67	4.42	4.15	4.16
第4阶	5.39	5.36	6.01	6.39	4.97	5.04	5.42	5.48		

Hz

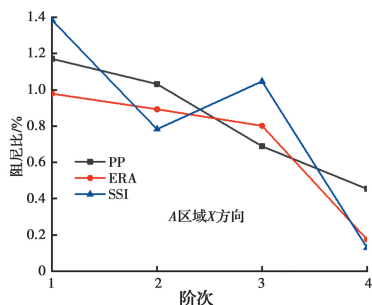
PP、ERA、SSI 算法识别 A 区域阻尼比结果见表 5 和图 9,以 SSI 算法作为参考,从表 5 可以看出,3 种算法识别阻尼比结果相对误差大于特征频率,

最大误差为 0.405,其中,ERA 法与 SSI 法误差随着阶次增加而逐渐减小。由图 9 可以看出,A 区域阻尼比随着阶次增加而呈减小趋势。

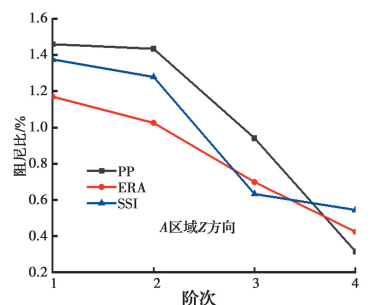
表 5 3 种算法下 A 区域阻尼比识别结果及误差

Table 5 Damping ratio identification results and errors in Area A by three algorithms

方向	算法	阻尼比/%				相对误差绝对值			
		1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
X	PP	1.171	1.032	0.689	0.454	0.213	0.249	0.358	0.324
	ERA	0.979	0.893	0.802	0.175	0.405	0.110	0.245	0.045
	SSI	1.384	0.783	1.047	0.130				
Z	PP	1.460	1.435	0.941	0.314	0.084	0.156	0.309	0.230
	ERA	1.170	1.025	0.698	0.423	0.206	0.254	0.066	0.121
	SSI	1.376	1.279	0.632	0.544				



(a) X 方向



(b) Z 方向

图 9 A 区域阻尼比对比曲线

Fig. 9 Damping ratio contrast curve of Area A

通过结构特征频率值,各区域的振型可以被识别,其中 3 种算法下各区域的振型计算结果见表 6。判断振型是否接近可从振型向量的方向与幅值大小入手,从计算结果来看,各节点振型幅值方向在 3 种算法识别下呈现一致性,且幅值误差最大为 2.22,误差较小,故城墙瓮城区域在 3 种算法识别下所得振型结果较为接近。篇幅所限,列出 A 区域 1 阶 3 种算法振型图对比(图 10)与 SSI 算法下 E 区域 3 阶模态振型图(表 7)。

表 6 模态振型幅值

Table 6 Modal vibration amplitude

节点号	方向	算法	振型幅值			
			1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
E-9	Y	PP	1.00	1.00	1.00	
		ERA	1.00	1.00	1.00	
		SSI	1.00	1.00	1.00	
	Z	PP	1.00	1.00	1.00	
		ERA	1.00	1.00	1.00	
		SSI	1.00	1.00	1.00	
E-13	Y	PP	-1.01	-1.88	1.32	
		ERA	-1.56	-1.02	0.63	
		SSI	-0.56	-1.73	0.70	
	Z	PP	3.65	1.23	-0.13	
		ERA	1.43	0.92	-0.69	
		SSI	2.65	0.52	-0.22	
E-25	Y	PP	-1.33	-1.36	2.38	
		ERA	-1.97	-1.69	1.48	
		SSI	-0.29	-1.26	1.59	
	Z	PP	6.35	-1.35	0.40	
		ERA	7.03	-0.94	0.90	
		SSI	8.02	-0.56	0.80	
E-29	Y	PP	2.21	2.56	3.01	
		ERA	1.69	1.23	1.33	
		SSI	1.06	1.01	1.96	
	Z	PP	2.42	-0.96	1.69	
		ERA	1.76	-0.57	1.26	
		SSI	2.67	-0.33	0.94	

续表 6

节点号	方向	算法	振型幅值			
			1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
A-3	Y	PP	-0.78	-5.93	-5.36	1.18
		ERA	-0.72	-5.99	-5.45	1.26
		SSI	-0.63	-6.32	-5.21	1.34
	Z	PP	-0.70	0.66	-0.36	0.36
		ERA	-0.39	0.56	-0.19	0.42
		SSI	-0.51	0.51	-0.28	0.49
B-11	Y	PP	1.00	1.00	1.00	1.00
		ERA	1.00	1.00	1.00	1.00
		SSI	1.00	1.00	1.00	1.00
	Z	PP	1.00	1.00	1.00	1.00
		ERA	1.00	1.00	1.00	1.00
		SSI	1.00	1.00	1.00	1.00
B-15	Y	PP	1.52	1.28	2.91	-0.52
		ERA	1.21	1.23	2.35	-0.82
		SSI	1.83	1.45	2.63	-1.02
	Z	PP	1.24	1.29	-0.23	6.28
		ERA	0.86	1.44	-0.51	5.73
		SSI	0.61	1.56	-0.63	6.31
C-21	Y	PP	2.03	6.61	9.03	-14.46
		ERA	1.59	6.78	9.26	-14.87
		SSI	1.49	7.05	8.81	-15.36
	Z	PP	0.48	-0.46	0.52	1.35
		ERA	0.75	-0.29	0.64	1.04
		SSI	0.93	-1.02	0.81	1.23
D-27	Y	PP	1.00	1.00	1.00	1.00
		ERA	1.00	1.00	1.00	1.00
		SSI	1.00	1.00	1.00	1.00
	Z	PP	1.00	1.00	1.00	1.00
		ERA	1.00	1.00	1.00	1.00
		SSI	1.00	1.00	1.00	1.00
D-32	Y	PP	1.49	0.75	-1.25	0.69
		ERA	1.62	0.89	-1.44	0.58
		SSI	1.74	1.03	-1.36	0.42
	Z	PP	0.61	0.73	-1.56	0.87
		ERA	0.49	0.85	-1.35	0.93
		SSI	0.53	0.91	-1.32	0.95

注:节点号字母代表测区,数字代表具体测点。

### 3 有限元模态分析

#### 3.1 建立有限元模型

通过 ANSYS 软件建立整体城墙瓮城区域有限

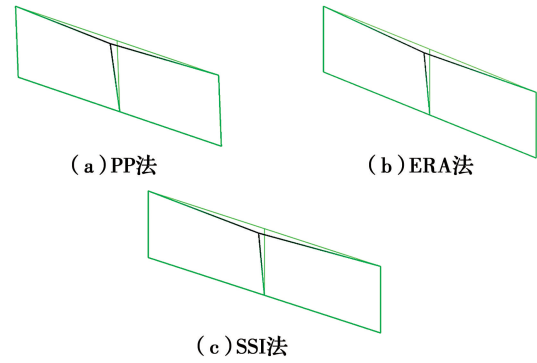


图 10 A 区域 3 算法振型图对比(X 向 1 阶)

Fig. 10 Comparison of vibration mode figures in Area A with three algorithms(direction X and rank 1)

表 7 E 区域振型图

Table 7 Vibration mode figure of Area E

方向	振型图		
Y			
	第 1 阶 2.58 Hz	第 2 阶 3.44 Hz	第 3 阶 4.15 Hz
	Z		
第 1 阶 2.59 Hz		第 2 阶 3.40 Hz	第 3 阶 4.16 Hz

元模型,由于是从结构的模态参数出发对城墙进行研究且城墙的形状规则对称,故建模时采用均匀的网格划分形式,划分方式采用自由划分,将基础底面设置为固定端,以 SOILD187 单元进行模拟,单元尺寸为 3 m,城墙模型与网格模型如图 11 所示。

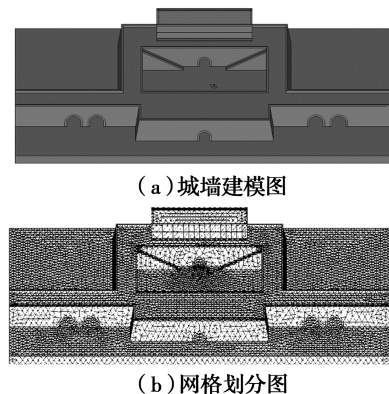


图 11 有限元模型

Fig. 11 Finite element model

#### 3.2 模态校核

分析结构动力反应时采用完全瞬态分析法。基于对历史文化遗产的保护,无法取得西安城墙砖材

并对其相关材性试验,故城墙具体结构材料参数需参照相关文献,如表 8。

表 8 结构材料参数  
Table 8 Structural material parameters

结构参数	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$
外层砌体 <sup>[19-21]</sup>	1 420	2. 24	0. 1
内部夯土 <sup>[19-21]</sup>	1 500	0. 06	0. 347
箭楼 <sup>[19-21]</sup>	1 580	2. 45	0. 15
地基土 <sup>[19-21]</sup>	1 800	0. 05	0. 35

注:文献中研究的城墙均为明代城墙。

研究表明<sup>[22]</sup>,可在结构基础底面按照一致激励法输入振动加速度,模型激励取测点 4 的加速度时程曲线,如图 12 所示。各测点位置处的速度时程曲线和振动速度峰值由数值分析得到,比较模拟数值与实测结果,发现特征频率范围均集中在 0~20 Hz,且频谱曲线吻合度高。故所建模型为有效模型,城墙瓮城区域的实际物理特性可以通过该模型反映。模拟值和实测值频谱曲线的对比结果见图 13(各测点频谱曲线相差不大,因此仅列出测点 3 的对比结果)。

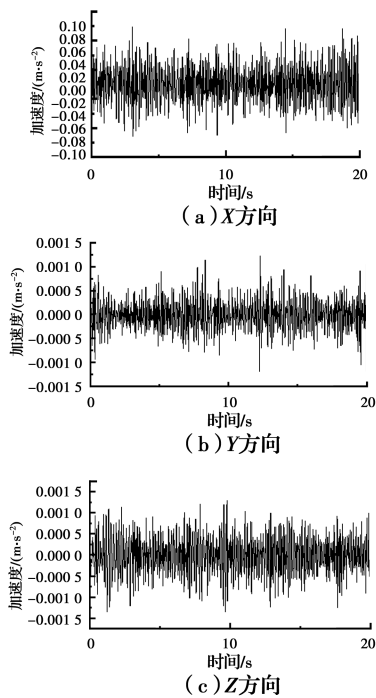


图 12 加速度时程曲线  
Fig. 12 Acceleration time-history curve

### 3.3 有限元模型模态分析

通过分块法分析城墙模型的模态,最终通过计算得出瓮城整体区域的前 3 阶频率与对应的振型图,如表 9 和图 14 所示。

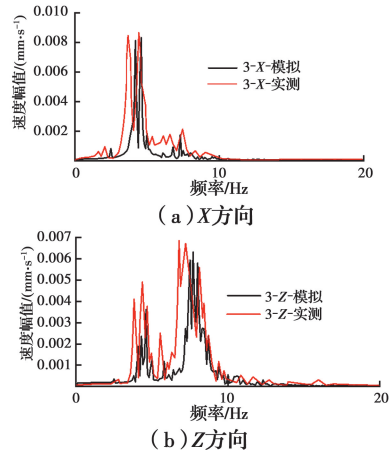


图 13 模拟与实测频谱曲线对比图  
Fig. 13 Comparison of simulated and measured spectrum curves

从表 9 中可以看出,有限元模型计算所得模态参数(模拟值)与试验值相符。总体来讲,两种方法分析识别所得结果较为接近,最大差值为 0. 25 Hz,误差小,在允许范围之内。

表 9 模拟与试验分析的模态参数对比  
Table 9 Comparison of modal parameters between simulation and experimental analysis

方法	特征频率/Hz		
	1 阶	2 阶	3 阶
模拟值	2. 53	3. 65	4. 01
试验值(Y 向)	2. 58	3. 44	4. 15
试验值(Z 向)	2. 59	3. 40	4. 16

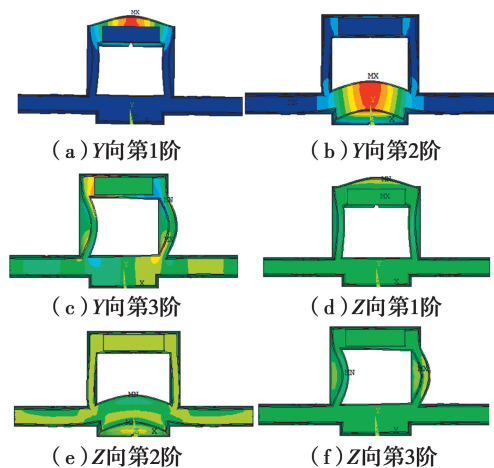


图 14 振型图(模拟)  
Fig. 14 Vibration map(simulation)

根据模拟所得振型,提取瓮城区域 4 个角点(节点号 9、13、25、29)与 3 种方法试验振型识别结果平均值进行对比,如表 10 所示。



为进行模态振型对比,引入振型 MAC,计算公式为

$$MAC_i = \frac{[(\boldsymbol{\varphi}_i^a)^T(\boldsymbol{\varphi}_i^e)]^2}{[(\boldsymbol{\varphi}_i^a)^T(\boldsymbol{\varphi}_i^a)][(\boldsymbol{\varphi}_i^e)^T(\boldsymbol{\varphi}_i^e)]} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_i^a$  为数值模拟计算所得第  $i$  阶振型向量; $\boldsymbol{\varphi}_i^e$  为试验实测所得第  $i$  阶振型向量。振型  $MAC_i$  的取值范围是  $0 \sim 1$ , 试验与模拟之间差异越小, 振型  $MAC$  则越趋近于 1, 当  $MAC=1$  时, 则表示二者振型完全吻合<sup>[23]</sup>。

通过振型  $MAC$  对试验与模拟振型结果进行对比, 根据表 10 可以得出, 振型  $MAC$  范围在  $0.891 \sim 0.997$  之间, 吻合度高。从数值上看, 模拟值总体大于试验值, 可能是由于建立模型时忽略了土体间接触和简化材料参数属性等原因所造成的。

表 10 振型幅值对比

Table 10 Comparison of vibration mode amplitude

阶次	方向	方法	节点 9	节点 13	节点 25	节点 29
1 阶	Y	试验	1.00	-1.38	1.53	1.99
		模拟	1.00	-2.53	2.64	2.68
	Z	试验	1.00	2.58	6.13	2.62
		模拟	1.00	3.32	6.89	2.93
2 阶	Y	试验	1.00	-1.54	-1.43	1.60
		模拟	1.00	-2.03	-2.88	3.02
	Z	试验	1.00	0.89	-0.95	-0.62
		模拟	1.00	1.05	-1.23	-1.55
3 阶	Y	试验	1.00	0.88	1.82	2.10
		模拟	1.00	1.33	1.69	3.22
	Z	试验	1.00	-0.35	0.70	1.30
		模拟	1.00	-0.96	0.62	1.60

## 4 结论

1) 路面车辆振动对西安城墙的影响大于地铁列车。现场动力测试表明, 城墙在复杂交通环境影响下的振动速度幅值约为  $0.1 \text{ mm/s}$ , 振动响应主要集中在  $20 \text{ Hz}$  以下。

2) PP 法、ERA 法和 SSI 法计算所得特征频率相对误差较小。试验模态分析表明, 综合 3 种算法得到的西安城墙瓮城处的特征频率主要集中在  $2 \sim 7 \text{ Hz}$  范围内, PP 法、ERA 法与 SSI 法通过计算识别的振型结果相似。

3) PP 法、ERA 法和 SSI 法可以应用于城墙这种特殊形态古建筑的模态参数计算上。通过模拟与试验对比分析, 模拟与试验识别的西安城墙瓮城处前 3 阶频率与振型误差较小, 最终得出其前 3 阶频

率在  $2.6、3.4、4.2 \text{ Hz}$  左右。

## 参考文献:

- [1] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 115-125.  
SHAN D S, LUO L F, LI Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 115-125. (in Chinese)
- [2] 俞茂宏, 刘晓东, 方东平, 等. 西安北门箭楼静力与动力特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1991, 25(3): 55-62.  
YU M H, LIU X D, FANG D P, et al. An experimental study of static and dynamic characteristics on the front tower over the ancient Xi'an city wall [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1991, 25(3): 55-62. (in Chinese)
- [3] 卢俊龙, 李凯, 李嘉怿. 某宋代砖塔结构整体损伤识别分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 61-66.  
LU J L, LI K, LI J Y. Analysis of integrated damage for a masonry pagoda built in song dynasty [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 61-66. (in Chinese)
- [4] 高延安, 杨庆山, 王娟, 等. 环境激励下古建筑飞云楼动力性能分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 144-148, 182.  
GAO Y A, YANG Q S, WANG J, et al. Dynamic performance of the ancient architecture of Feiyun pavilion under the condition of environmental excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 144-148, 182. (in Chinese)
- [5] 乔冠东. 交通激励作用下聊城光岳楼动力特性及动力响应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
QIAO G D. Analysis of dynamic characteristics and dynamic response of Liaocheng Guangyue tower under traffic excitation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 80-86.  
REN W X. Comparison of system identification methods using ambient vibration measurements [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 2001, 29(6): 80-86. (in Chinese)
- [7] 吴明, 杨永华, 陈东. 基于峰值法的巨型框架结构试验模态分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015, 41(4): 509-512.  
WU M, YANG Y H, CHEN D. Test modal analysis of mega frame structures based on peak method [J]. Journal of Donghua University (Natural Science),

- 2015, 41(4): 509-512. (in Chinese)
- [8] JUANG J N, COOPER J E, WRIGHT J R. An eigensystem realization algorithm using data correlations (ERA/DC) for modal parameter identification [J]. *Control Theory & Advanced Technology*, 1988, 4(1): 5-14.
- [9] 张小宁. 基于随机子空间方法的结构模态参数自动识别[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHANG X N. Stochastic subspace method for automotive identification of structural modal parameters [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 翟杰群. 地铁振动传播的现场测试与数值分析[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
ZHAI J Q. Test and analysis of vibration propagation caused by the subway train [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [11] 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.  
Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 王济, 胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006.  
WANG J, HU X. Application of MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, Intellectual Property Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [13] 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LIU W N, MA M. Metro train induced environmental vibrations: Prediction, evaluation and control [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [14] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
XIA H. Traffic induced environmental vibrations and controls [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
WANG T Y. Study on subway-induced environmental vibration and isolation method of building from it [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [16] 贾颖绚, 刘维宁, 马蒙, 等. 地铁列车运行振动对环境影响因素的参数分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2016, 19(1): 30-34.  
JIA Y X, LIU W N, MA M, et al. Parameters analysis on environmental vibrations induced by subway trains [J]. *Urban Mass Transit*, 2016, 19(1): 30-34. (in Chinese)
- [17] 李正心. 振动信号重采样与转速软测量技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.  
LI Z X. Research on vibration signal resampling and rotating speed soft measurement technology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [18] 陈卓. 基于小波和奇异值理论的西安钟楼模态参数识别[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.  
CHEN Z. The modal parameters identification of Xi'an Bell Tower based on wavelet and singular value theory [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 俞茂宏, ODA Y, 方东平, 等. 中国古建筑结构力学研究进展[J]. *力学进展*, 2006, 36(1): 43-64.  
YU M H, ODA Y, FANG D P, et al. Advances in structural mechanics of Chinese ancient architectures [J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(1): 43-64. (in Chinese)
- [20] 朱才辉, 刘钦佩, 周远强. 古建筑砖-土结构力学性能及裂缝成因分析[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(9): 175-186.  
ZHU C H, LIU Q P, ZHOU Y Q. Mechanical properties and cracking analysis of brick-clay structure of ancient building [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(9): 175-186. (in Chinese)
- [21] 周远强. 西部某古城墙病害影响因素研究初探[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
ZHOU Y Q. Research on the disease factors affecting an ancient city wall in the west of China [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [22] 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 Z B. 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. (in Chinese)
- [23] 郭佳琛. 藏式宫殿建筑门厅结构动力特性识别与力学性能分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
GUO J C. Dynamic characteristic identification and mechanical property analysis of the entrance hall structure of Tibetan palace building [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)