

地铁列车振动对颐和园北宫门古建筑木结构影响的实测与分析

巴振宁¹, 符瞻远¹, 付继赛¹, 马鸣昊², 高愈辉²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学国际工程师学院, 天津 300072)

摘要: 针对地铁运行对木结构古建筑的影响这一问题, 本文以颐和园北宫门和北京市地铁 4 号线为研究对象, 采用 ABAQUS 建立了列车-隧道-土层-木结构古建筑耦合模型。通过与现场实测结果对比, 验证了有限元模型的精度, 并系统地研究了地铁运行时地铁线路与古建筑之间的夹角、列车速度对木结构古建筑振动的影响。结果表明: 场地地表与北宫门结构的振动强度的模拟结果与实测结果基本一致, 实际工况下北宫门的振动响应满足限值要求; 地铁线路与临近木结构古建筑长轴方向夹角为 0° 时, 结构振动强度最大, 且对于不同夹角, 振动最强烈的均为距地铁线路最近的结构柱; 随着列车速度的增大, 木结构古建筑的振动强度显著增大, 与车速 60 km/h 时相比, 车速为 80 km/h 时结构的振动幅度增加了 19.67%。

关键词: 木结构古建筑; 地铁列车; 现场实测; 有限元分析; 振动影响

中图分类号: TU311.3; U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1602-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.015

引言

木结构是中国古代建筑重要的结构形式, 广泛分布于中国各地, 具有极高的艺术价值、历史意义和科学价值, 但由于年代久远且结构形式复杂, 具有易损伤、修复难度大等特点^[1]。

近年来随着轨道交通建设的快速发展, 越来越多的地铁线路建设在木结构古建筑附近, 地铁运行产生的长期、反复的振动荷载, 必然会对其安全造成不可忽视的影响。许多学者如马蒙等^[2-3]、李团社等^[4]、巴振宁等^[5]系统地研究了古建筑木结构在地铁线路运行下的振动响应, 对中国制定针对木结构古建筑的保护措施, 减小地铁运行对临近木结构古建筑带来的危害具有指导意义。

目前, 国内外学者通常采用经验法^[6-7]、数值法^[8-9]和现场测试法^[10-11]对地铁运行振动对古建筑的影响进行研究。然而, 经验法无法全面考虑影响轨道交通振动的诸多因素^[12]; 数值法具有较强的便捷性, 可用于多种工况分析, 但数值模型的假设对计算结果的精度有较大影响^[13]; 现场测试法结果最为准确, 但仅适用于针对现有线路进行分析^[14]。

鉴于中国对古建筑的保护愈发重视, 开展相关古建筑振动测试较为困难, 难以获得相关的实测动力参数。此外, 关于地铁列车振动对木结构古建筑影响的参数化分析虽有一定研究, 但较少考虑线路与古建筑之间夹角等情况。

本文以颐和园北宫门和北京市地铁 4 号线为研究对象, 采用大型有限元分析软件 ABAQUS, 建立了列车-隧道-土层-木结构古建筑耦合模型。参照《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452—2008^[15]建议的评估方法, 以速度半峰峰值为限值, 将现场实测结果与有限元计算结果进行对比, 验证了模型的精度, 在此基础上, 进一步研究了地铁线路与古建筑之间的夹角和距离、列车速度以及隧道埋深对木结构古建筑的影响。

1 工程概况

北宫门位于北京市海淀区颐和园内, 曾因战乱损毁, 重建于清代同治年间(19 世纪 70 年代), 距今约 150 年的历史^[16]。建筑高度为 12 m, 通面宽 23.89 m, 通进深 5.14 m。其结构形式为二层木结构建筑。结构整体从上到下分为屋架层和柱网层, 一层与二层柱网结构相同, 屋架与梁采用斗拱形式连

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178495); 嘉峪关世界文化遗产监测系统工程(二期)嘉峪关木构城楼现状结构分析与状态评估研究(JYGZCDL2017024G)。

接,梁柱采用榫卯形式进行连接,北宫门建筑整体结构如图 1~4 所示。

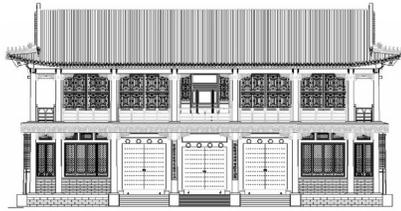


图 1 北宫门正立面图

Fig. 1 The front elevation of the North Palace Gate

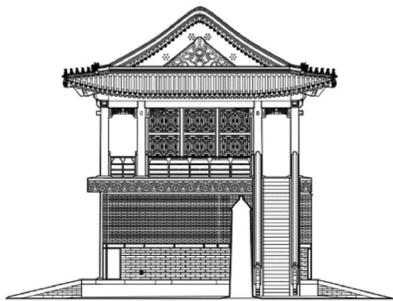


图 2 北宫门侧立面图

Fig. 2 Side elevation of the North Palace Gate

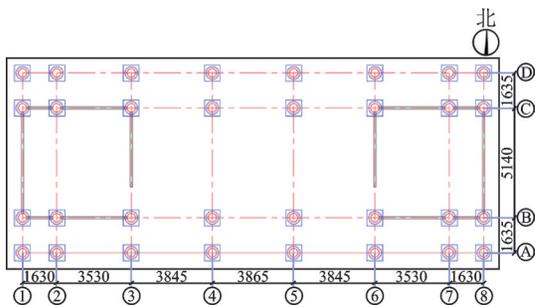


图 3 北宫门一层柱网分布图(单位:mm)

Fig. 3 Distribution map of column network on the first floor of the North Palace Gate(Unit:mm)

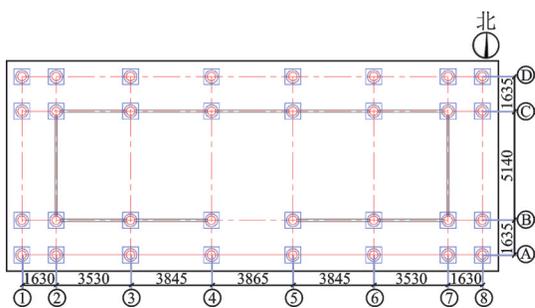


图 4 北宫门二层柱网分布图(单位:mm)

Fig. 4 Distribution map of the column network on the second floor of the North Palace Gate(Unit:mm)

北京地铁 4 号大兴线在北宫门的东北部穿过,结构中心位置距地铁线路约为 100 m,地铁线路的走向与建筑长轴夹角为 45°,地铁隧道埋深为 10 m,地铁运营车速为 60 km/h,场地平面布置如图 5 所示。

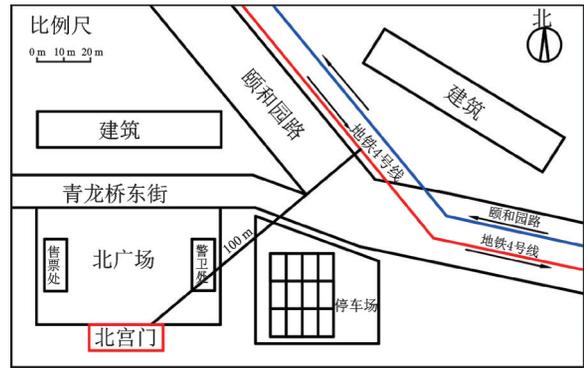


图 5 北宫门附近场地平面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the site near the North Palace Gate

2 有限元模型建立

2.1 模型的建立

利用 ABAQUS 有限元软件,建立如图 6 所示的结构-隧道-列车振动耦合模型。北宫门结构根据图 1~4 建立,对结构进行适当简化,忽略一些非受力构件(如砖砌体)并转化为对应荷载施加到相应构件上。结构主体模型中梁、柱、枋均采用梁单元(单元类型 B32)进行模拟,楼板和屋面采用壳单元(单元类型 S4R)进行模拟,础石采用实体单元(单元类型 C3D8R)进行模拟,网格尺寸近似为 0.2 m。

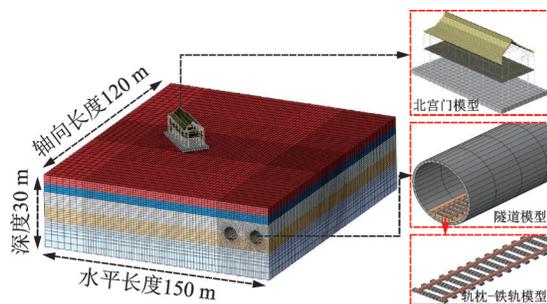


图 6 结构-隧道-列车振动耦合有限元模型

Fig. 6 Structure-tunnel-train vibration coupling finite element model

隧道、道床与轨枕均采用实体单元进行模拟,网格尺寸为 0.2 m;其中,隧道内径为 5.4 m,外径为 6 m;钢轨为 T60 型,截面特性参数参考标准[17]选取,模型采用对应各部分尺寸的“工”字形截面梁单元进行简化模拟,详细参数输入如图 7 所示,单向两轨间距 $d=1.435$ m;轨枕的采用 II 型钢筋混凝土轨枕,并将其近似为 2000 mm×170 mm×200 mm 的长方体。

土层有限元模型尺寸为 30 m(垂向深度)×120 m(轴向长度)×150 m(水平宽度),水平方向上

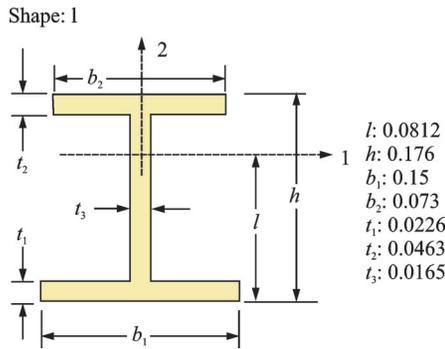


图7 铁轨截面及工字梁参数输入(单位:mm)

Fig. 7 Rail section and I-beam parameter input (Unit:mm)

模型的长度大于10倍的隧道直径,可获得较高的计算精度,降低边界效应^[18]。单元类型选用C3D8R单元,模型单元尺寸为0.3~2.5 m。本文的土层介质参数参考文献[19]中北京海淀区典型地质参数,其中的最小剪切波速为 $V_s=215$ m/s。根据Yang等^[20]的研究结果:用 λ_{smin} 表示所关注振动波的最小剪切波波长,当单元长度取 $\frac{1}{6}\lambda_{smin}$ 时,便已经可以取得较高的精度。此外,在列车运营环境下,振动对古建筑结构有显著影响的频率范围为0~50 Hz,进而得到适宜的网格尺寸为 $\frac{1}{6}\lambda_{smin} = V_s/f_{max} \approx 0.67$ m。为保证精度的同时,节约计算成本,将隧道附近和北宫门附近的网格加密,最终场地的单元尺寸为0.3~2.5 m。

表2 土层材料参数

Tab. 2 Soil material parameters

土层序号	土类	厚度/m	埋深/m	剪切波速/($m \cdot s^{-1}$)	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	动弹性模量/MPa	泊松比
1	黏质粉土	2.0	4.0	215	1650	2.05×10^2	0.35
2	砂质粉土	2.0	6.0	249	2010	3.36×10^2	0.35
3	粉砂	8.0	13.0	300	2010	4.81×10^2	0.33
4	卵石	8.0	21.0	395	2010	8.15×10^2	0.30
5	粉质黏土	10.0	30.0	426	2050	9.67×10^2	0.30

表3 石砖基台物理参数

Tab. 3 Palsical parameters of stone brick abutment

名称	材料	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	动弹性模量/GPa	泊松比
建筑基台	石料	2720	80	0.2

2.3 接触条件

土体与隧道间采取面面接触的形式(Surface to Surface Contact),法向采取硬接触(Hard Contact),切向采取罚函数(Penalty)模拟,摩擦系数取为0.85;道床-轨枕-轨道间采取绑定约束(Tie)。

北宫门结构自身需考虑斗拱、梁柱榫卯节点、柱础与基台之间的连接设置。如图8和9所示,梁柱卯

2.2 材料参数

北宫门结构所用木材为松木,根据《木结构设计标准》GB 50005—2017^[21]和赵均海等^[22]对木材参数的取值要求,确定落叶松新材的物理力学性质参数。考虑到北宫门修建距今已超过100年,又根据《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165—2020^[23]中建议的折减系数要求,将对应材料的弹性模量与剪切模量给予0.85的折减调整,最终确定木材的力学参数如表1所示。不同方向的弹性模量和泊松比利用ABAQUS中的ENGINEERING CONSTANT定义。场地土层参数同样参考2.1节中提及的海淀区典型地质参数,简化后如表2所示。北宫门石砖基台物理参数如表3所示。隧道、道床、轨枕以及轨道的材料参数设置如表4所示。北宫门结构阻尼比取0.035,土体阻尼比统一取0.05,均采用Rayleigh阻尼设置单元的阻尼参数。

表1 木材材料参数

Tab. 1 Wood material parameters

E_x /MPa	E_y /MPa	E_z /MPa	G_{xy} /MPa	
9837	1893	1893	619	
G_{yz} /MPa	G_{zx} /MPa	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
234	619	0.51	0.39	0.48

注: E_x, E_y 和 E_z 分别为顺纹、径向和弦向的弹性模量; G_{xy}, G_{yz} 和 G_{zx} 分别为弦切面内、顺纹面内和径切面内的剪切模量; μ_{xy}, μ_{yz} 和 μ_{zx} 分别为弦切面内、径切面内和顺纹面内的泊松比。

表4 隧道、道床、轨枕及轨道材料参数

Tab. 4 Tunnel, track bed, sleeper and track material parameters

名称	材料	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	动弹性模量/GPa	泊松比
隧道管片	C50混凝土	2400	25.9	0.2
道床	C30混凝土	2400	22.5	0.2
轨枕	C30混凝土	2400	34.5	0.2
轨道	T60钢轨	7350	235.0	0.2

榫节点与斗拱节点保存的较为完好,均可视为中国古典建筑典型的半刚性连接方式,实施时采用CONNECTER单元对斗拱和榫卯节点进行模拟。



图 8 北宫门木结构中的斗拱节点

Fig. 8 Dougong nodes in the wooden structure of the North Palace Gate



图 9 北宫门木结构中的榫卯节点

Fig. 9 Mortise-tenon joints in the wooden structure of the North Palace Gate

节点刚度根据文献[24]确定,如表 5 所示。柱脚与础石参考文献[25]的处理方法,将柱脚与础石的连接节点近似简化为铰接节点。

表 5 柱-梁、柱-枋和斗拱节点刚度参数设置

Tab. 5 Stiffness settings of beam-column tenon and dougong nodes

节点类型	$k_x/(kN \cdot m^{-1})$	$k_y/(kN \cdot m^{-1})$	$k_z/(kN \cdot m^{-1})$	$k_\theta/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$
柱-梁	1.41×10^9	1.26×10^9	1.41×10^9	7362×10^9
柱-枋	1.26×10^9	1.41×10^9	1.41×10^9	7362×10^9
斗拱	2197.3	2197.3	127950	296.71

注: k_x, k_y 和 k_z 分别为 x, y 和 z 轴方向拉伸弹簧的刚度系数; k_θ 为弯曲弹簧的刚度系数。

2.4 边界条件

土体模型采用黏弹性边界削弱土层模型的边界效应,提高耦合模型的计算精度并降低计算的收敛难度^[26]。具体实施时,通过对 ABAQUS 软件进行二次开发,运用 Python 编程输入每层土参数(密度、剪切波速和压缩波速等)并计算每层土的弹簧刚度、阻尼系数以及单元影响面积,批量化自动设置各土层的弹簧阻尼器,添加黏弹性边界后的土层有限元模型如图 10 所示。

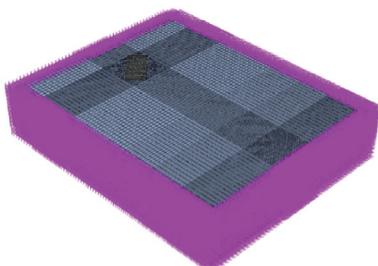
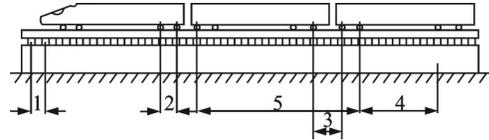


图 10 添加黏弹性边界后的场地土层模型

Fig. 10 Model of site after adding viscoelastic boundary

2.5 荷载的施加

北京地铁 4 号线运营列车为 A 型车,具体车辆轴距参数和物理参数如图 11 与表 6 和 7 所示^[27-28],列车速度约为 60 km/h。



1—扣件间距;2—转向架内轴距;3—转向架间距;
4—车辆内轴距;5—车辆间轴距。

图 11 地铁 A 型车特征距离

Fig. 11 Characteristic distance of Metro Type A car

表 6 地铁 A 型车轴距参数

Tab. 6 Wheelbase parameters of Metro Type A car

编号	特征距离/m
1	0.6
2	2.5
3	3.9
4	13.2
5	24.6

表 7 地铁 A 型车物理参数

Tab. 7 Physical parameters of Metro Type A car

建模物理参数	数值/kg
车身质量	44000
转向架质量	2418
轮对质量	1150

采用下式所示激振力函数^[29]求得列车荷载:

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + A_3 \sin(\omega_3 t) \quad (1)$$

式中 $F(t)$ 为振动荷载; A_0 为车轮静载, $A_1 \sim A_3$ 为因轨道不平顺而产生的列车动力荷载,计算方法如下:

$$A_i = M_0 a_i \omega_i^2, \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中 M_0 为列车的簧下质量(一个轮对质量加两个转向架质量); $\omega_1 \sim \omega_3$ 为对应以上三种振动附加荷载的圆频率,计算方法如下:

$$\omega_i = 2\pi v/L_i, \quad i=1, 2, 3 \quad (3)$$

式中 v 为列车行驶速度。

式(2)和(3)中, L_i 和 a_i 对应行车平稳性、作用到线路上的动力附加荷载和波形磨耗三种控制条件下的波长与矢高,根据中国地铁线路的轨道情况^[30],分别取三种典型不平顺波长和相应矢高为: $L_1=10$ m, $a_1=5$ mm; $L_2=2$ m, $a_2=0.4$ mm; $L_3=0.4$ m, $a_3=0.08$ mm。

根据以上计算方法,并结合表 6 和 7 中的对应参数即可求得 60 km/h 速度下列车单个轮载时程曲线,如图 12 所示(时间间隔取 5×10^{-3} s)。并借助

DLOAD子程序实现荷载的移动施加。

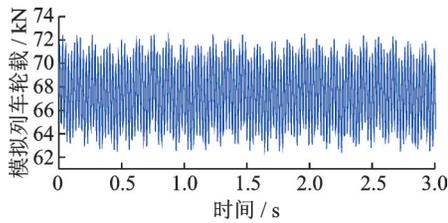


图12 60 km/h速度下模拟列车轮载时程曲线

Fig.12 Simulated train wheel load time history curve at 60 km/h speed

3 实测结果与数值模拟对比验证

3.1 仪器介绍及参数设置

为验证所建立模型数值模拟结果的可靠性,对北宫门受地铁运行振动影响情况进行现场实测。测量仪器采用英国 Guralp Systems 公司生产的 CMG-5TCDE 强震仪搭配 Scream 软件(可同时测量三个方向的振动加速度,最大采样频率可达到 1000 Hz)与 ART3 软件(可实现数据的实时操作以及滤波、幅值查看以及傅里叶变换等功能)。测试仪器与操作软件如图 13 所示。

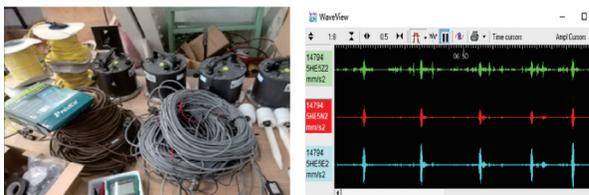


图13 CMG-5TCDE一体化测振仪和ART3软件

Fig.13 CMG-5TCDE integrated vibration tester and ART3 software

根据参考文献[31]中的研究,列车运营环境下,振动对古建筑结构显著影响频率范围为 0~50 Hz,属于低频振动。此外,由于数据离散时会产生频率混叠现象,根据奈奎斯特采样定理(当采样频率大于信号中最高频率的 2 倍时,采样得到的数字信号就能够较为完整地保留信号的原始信息),将此次测试的采样频率定为 200 Hz。

3.2 测点布置

为尽可能分析场地振动传播规律,场地测点布置如下:沿地铁-古建筑的线路上每隔 25 m 布置一个测点,共 5 个测点,并标记为 0 m 测点、25 m 测点、50 m 测点、75 m 测点与 100 m 测点,其中 0 m 测点代表地铁线路正上方,100 m 测点非常靠近建筑基台,可作为振动由场地传至建筑前的状态参考。确定西北至东南方向为列车行驶方向(数值模拟列车也按此方向运行),不同测点同步测量,且为了保证水平

振动参考量的一致性,仪器所记录的两向水平振动的方向统一以北宫门的建筑朝向(正南正北)为基准,整体场地测点布置情况如图 14 所示。

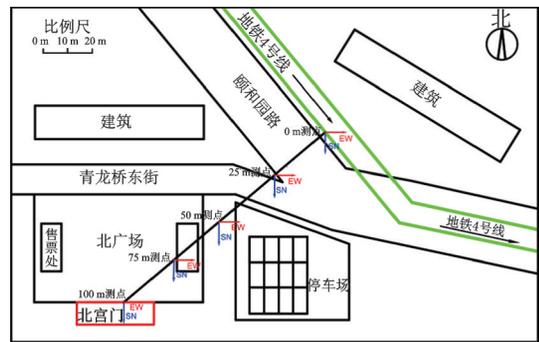


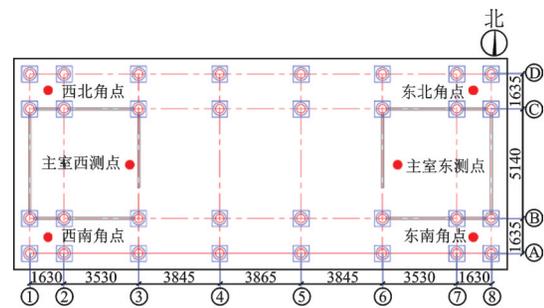
图14 现场测试采样点示意图

Fig.14 Schematic diagram of sampling points for field test

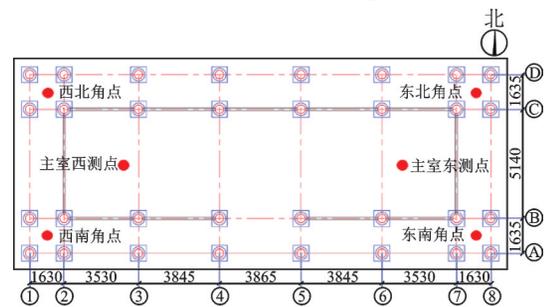
结合文献[15]中对古建振动测量的相关规定,同时考虑到测试仪器的特性,古建筑木结构测点布置方案如下:在一层也就是建筑基台上,在北宫门东、西侧中央地面各布置 1 个测点,同时在基台的四个角点附近各布置测点,以测量基台中央的振动量水平;在二楼楼面上,在一层对应角点靠近柱的位置各布置 1 个测点,以了解振动在建筑上垂直传播的规律,同时在二楼主室内靠东和靠西的楼板中央位置布置 2 个测点。古建筑一、二层测点布置情况如图 15 所示。

3.3 结果对比

本文参考文献[15]的限值要求,对木结构的评估



(a) 北宫门古建筑一层测点布置图
(a) Layout of measuring points on the first floor of the North Palace Gate ancient building



(b) 北宫门古建筑二层测点布置图
(b) Layout of measuring points on the second floor of the North Palace Gate ancient building

图15 北宫门测点布置图(单位:mm)

Fig.15 Layout of measuring points of the North Palace Gate (Unit:mm)

采用水平向速度半峰峰值进行评价,具体如表 8 所示。鉴于北京颐和园属于国家文物保护单位且北宫门所用材料为松木(弹性波速一般小于 4000 m/s^[32]),确定北宫门振动限值为 0.18 mm/s。

表 8 古建筑木结构容许振动速度半峰峰值(单位:mm/s)
Tab. 8 Half peak value of allowable vibration velocity of wooden structure ancient building (Unit:mm/s)

保护级别	控制点位置	控制点方向	顺木纹 $V_p/(m \cdot s^{-1})$		
			<4600	4600~5600	>5600
全国重点文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.18	0.18~0.22	0.22
省级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.25	0.25~0.30	0.30
市、县级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.29	0.29~0.35	0.35

注: V_p 为古建筑木结构弹性纵波传播速度。

3.3.1 场地反应

图 16 给出了场地速度半峰峰值实测与数值模拟对比情况,对比振动量选取列车经过时段 12 s 内的东西向和南北向水平振动的速度半峰峰值。

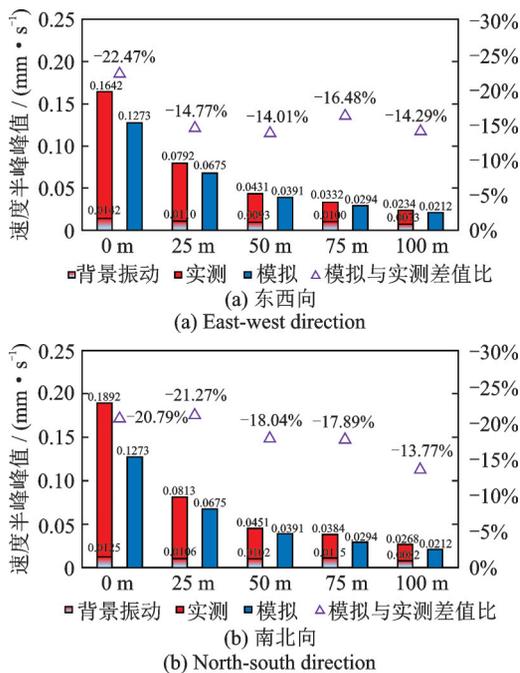


图 16 场地地表模拟与实测速度半峰峰值衰减对比
Fig. 16 Comparison of the half-peak attenuation of velocity at the site surface simulation and actual measurement

对图 16(a)和(b)进行分析可知,场地地表速度半峰峰值的模拟结果与实测结果衰减趋势大致相同,场地模拟振动强度值小于实测值,距地铁隧道较近处的误差值较大,0 m 拾振点的误差为 22.47%,其余拾振点的误差均在 10%~21%之间。这是由于 0 m 与 25 m 测点位于颐和园路的两端(见图 14),背景振动测试结果较大导致实测结果与模拟结果的误差值比其他测点处的误差值大。

3.3.2 北宫门结构反应

(1) 振动速度半峰峰值对比

建筑结构拾振点的振动速度半峰峰值模拟结果与实测结果对比如图 17 和 18 所示。由图 17 和 18 中数据可得,北宫门各测点振动速度半峰峰值最大为 0.0893 mm/s,出现在二层东北角点位置,小于文献

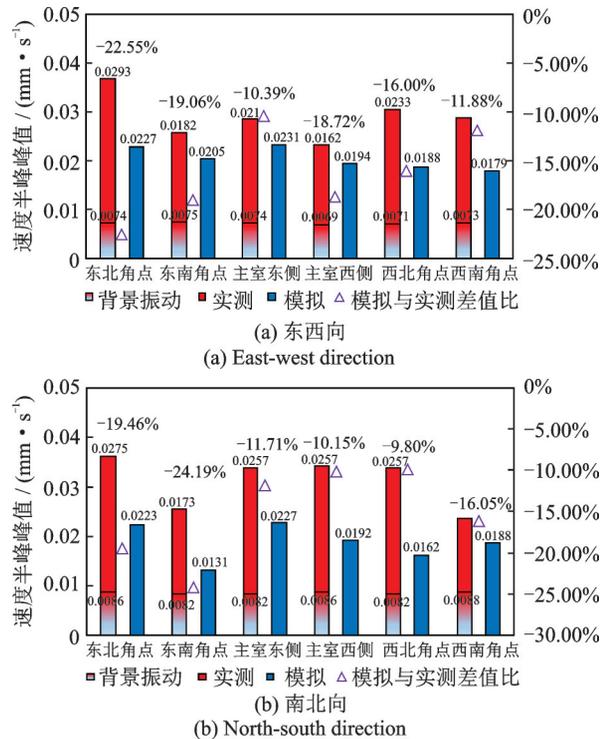


图 17 一层各测点水平振动速度半峰峰值
Fig. 17 Half-peak value of horizontal vibration velocity at each measuring point on the first floor

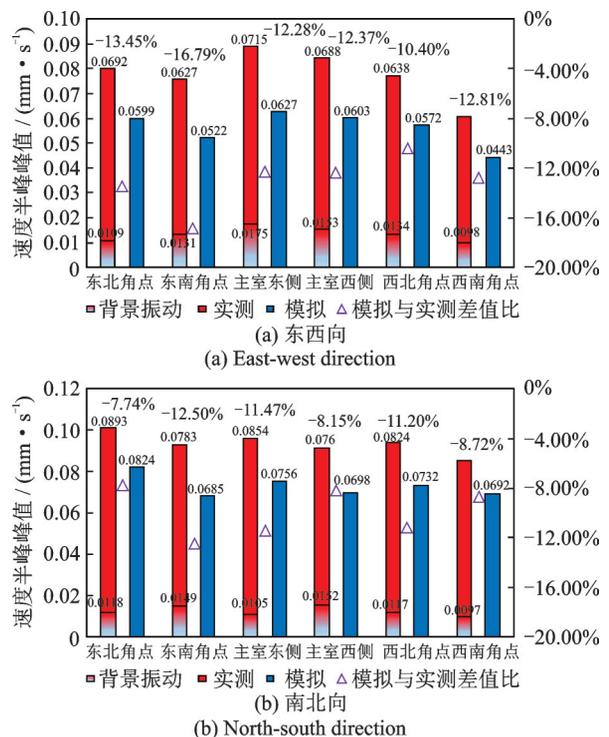


图 18 二层各测点水平振动速度半峰峰值
Fig. 18 Half-peak value of horizontal vibration velocity at each measuring point on the second floor

[15]中的限值要求,结构模拟结果与实测结果的误差在8%~25%不等,二层误差略小于一层。此外,模拟结果中的建筑各部分振动强度规律与实测大致相同,即二层振动强度大于一层,二层楼面振动强度是一层对应测点的2.3~4.5倍左右;另外模拟结果中的建筑振动强度同样呈由东北侧至西南侧减小的趋势。

(2) 频域对比

选择一层主室东测点和二层主室东测点进行频谱对比,结果如图19和20所示。

从频谱图像间的对比可得,ABAQUS有限元模拟所得到的振动频率与实测所得的振动频谱曲线走势一致,且主频率点差距不大。

通过上述对场地和北宫门结构的时域和频域振动响应对比分析可知,有限元模拟方法虽有一定的误差,但均达到了定性分析的要求,间接验证了隧道-土层耦合模型和采用激振力函数求得列车荷载以及DLOAD子程序实现荷载的移动施加的合理性。分析误差原因主要是数值模拟不能考虑场地中受偶然因素影响较大的背景振动,而距地铁隧道较近处的场地振动响应受背景振动的影响较大。

4 数值模拟分析

本文采取单一变量法的思路,共制定如表9所示的6种工况,对建筑长轴与线路的夹角、列车速度进行参数化分析。

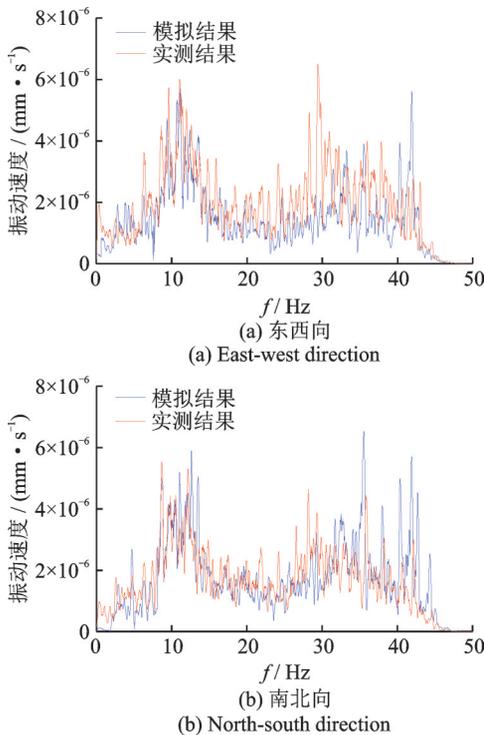


图19 一层主室东测点频谱对比
Fig. 19 Spectrum comparison of measurement points in the east side of main room on the first floor

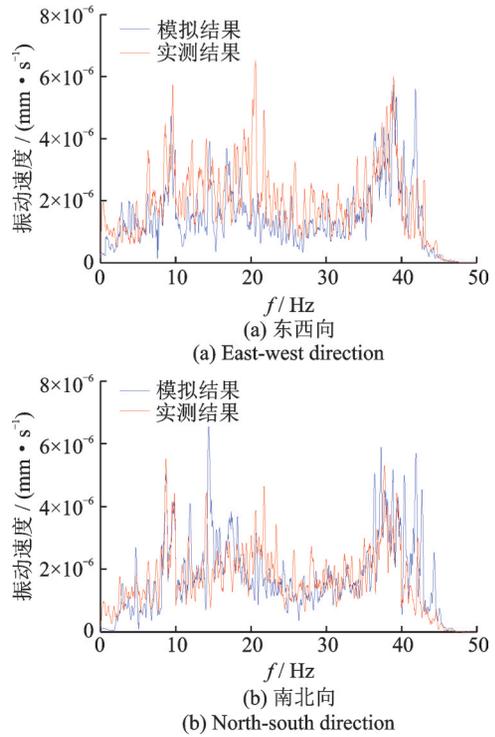


图20 二层主室东测点频谱对比
Fig. 20 Spectrum comparison of measurement points in the east side of main room on the second floor

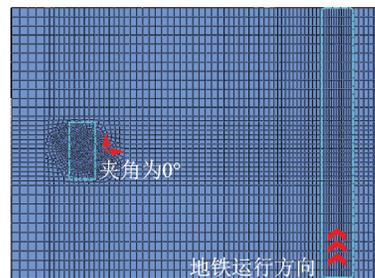
表9 古建筑地铁运营振动影响工况

Tab. 9 Working conditions of effects of subway operating vibration on ancient buildings

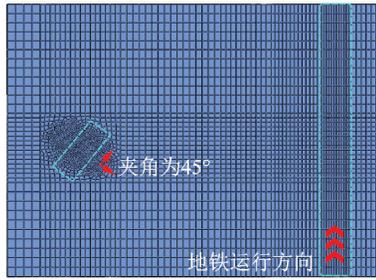
影响因素	确定工况参数	变化工况参数
古建筑朝向	隧道埋深: 10 m 列车速度: 60 km/h 线路距离: 50 m	建筑长轴与线路夹角: 0°, 45°, 90°
列车速度	隧道埋深: 10 m 线路距离: 50 m 建筑长轴与线路夹角: 0°	运营车速: 60, 70, 80 km/h

4.1 古建筑朝向

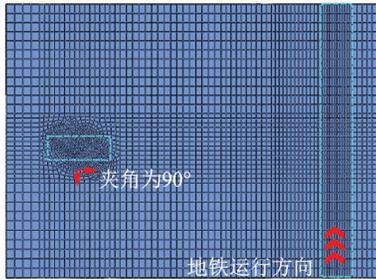
将模拟古建筑长轴与盾构隧道线路的夹角分别设置为0°, 45°和90°,以研究建筑与地铁线路的夹角对结构振动的影响。采用设置局部坐标系的方式将输出结果转化成长轴x向、短轴y向的数据,同时计算合成向峰值,工况示意如图21所示,计算结果如表10所示。



(a) 建筑长轴与线路夹角0°
(a) The angle between the long axis of the building and the line is 0°



(b) 建筑长轴与线路夹角45°
(b) The angle between the long axis of the building and the line is 45°



(c) 建筑长轴与线路夹角90°
(c) The angle between the long axis of the building and the line is 90°

图 21 建筑长轴与线路夹角为 0°, 45°和 90°工况

Fig. 21 The angle between the long axis of the building and the subway line is 0°, 45° and 90° working cases

观察表 10, 可发现三种夹角结构振动强度大小呈现如下趋势: 0°夹角 > 45°夹角 > 90°夹角。同时, 通过对比 0°和 90°工况下的振动幅值可以发现, 不同夹角下, 结构沿两主轴方向的振动强度差距有明显差异, 具体表现为: 当 0°时, y 向振动强度为 x 向的 1.6~2.7 倍; 当 90°时, x 向振动强度为 y 向的 1.5~1.7

倍。该现象的原因为: 对于不同的振动波入射角度, 结构所表现出来的振型特性有所不同。

另外, 可以发现, 三种角度工况下, 各柱的振动强度基本遵循“近大远小”的规律, 且振动最强烈的均为距地铁线路最近的拾振柱。例如: 0°建筑长轴-线路夹角工况下, 距线路最近的柱 D4 振动强度最大, 在 45°和 90°建筑长轴-线路夹角工况下, 距离线路最近的柱 C8 振动强度最大。该现象的原因为: 振动传播过程中, 场地振动强度随水平距离的增加而衰减, 故距离线路较近的振动强度较大。

4.2 列车速度

将地铁列车速度分别取为 60, 70 和 80 km/h, 研究不同车速下结构的振动影响。本节以振动强度最大的柱 D4 为例进行分析, 图 22 给出了三种速度情况下柱 D4 的振动速度峰值。

由图 22 可知, 不同速度情况下, 结构振动强度均沿结构高度逐渐增大。且随着车速的增加, 各部分的振动强度均明显增大。以 y 方向为例进行说明: 当列车车速为 60 km/h 时, 柱 D4 二层柱顶振动峰值为 0.1749 mm/s; 车速为 70 km/h 时, 振动速度峰值为 0.1888 mm/s, 相对车速 60 km/h 时增大幅度为 7.95%; 车速为 80 km/h 时, 振动速度峰值为 0.2093 mm/s, 相对车速 60 km/h 时增大幅度为 19.67%。

表 10 建筑长轴与线路夹角为 0°, 45°和 90°工况各拾振点水平合成向速度幅值

Tab. 10 The horizontal composite peak value of the vibration speed at each pick-up point when the angle between the long axis of the building and the subway line is 0°, 45° and 90°

柱编号	拾振点位置	0°夹角工况		45°夹角工况		90°夹角工况	
		y 向/x 向	合成向幅值/(mm·s ⁻¹)	y 向/x 向	合成向幅值/(mm·s ⁻¹)	x 向/y 向	合成向幅值/(mm·s ⁻¹)
柱 C1	柱底	1.56	0.0868	1.02	0.0836	1.51	0.0726
	一层柱顶	2.22	0.1376	1.15	0.1259	1.57	0.1193
	二层柱顶	2.38	0.1721	1.20	0.1590	1.59	0.1539
柱 C8	柱底	1.67	0.0883	1.03	0.0909	1.46	0.0843
	一层柱顶	2.38	0.1444	1.20	0.1413	1.53	0.1376
	二层柱顶	2.63	0.1805	1.23	0.1803	1.56	0.1779
柱 C4	柱底	1.56	0.0835	1.03	0.0866	1.47	0.0753
	一层柱顶	2.33	0.1372	1.23	0.1344	1.57	0.1251
	二层柱顶	2.50	0.1715	1.23	0.1692	1.60	0.1610
柱 A4	柱底	1.67	0.0805	1.03	0.0808	1.47	0.0767
	一层柱顶	2.27	0.1288	1.15	0.1223	1.60	0.1264
	二层柱顶	2.44	0.1604	1.20	0.1567	1.65	0.1646
柱 D4	柱底	1.54	0.0959	1.23	0.0885	1.45	0.0768
	一层柱顶	2.13	0.1528	1.18	0.1365	1.59	0.1266
	二层柱顶	2.33	0.1907	1.22	0.1728	1.63	0.1656

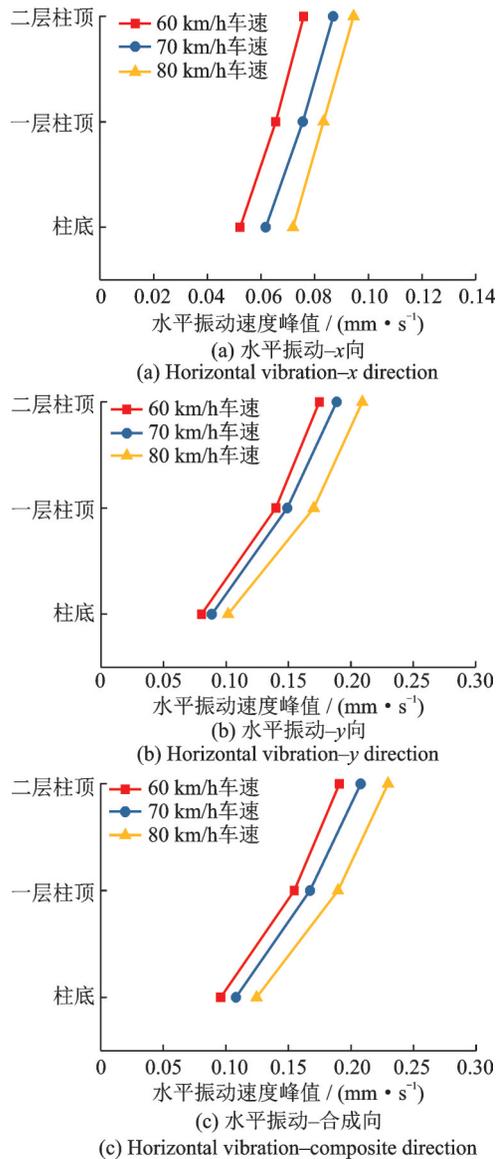


图22 不同车速下建筑结构柱D4水平振动强度

Fig. 22 Comparison of horizontal vibration intensity of building structure column D4 under various speeds

5 结论

本文以北京市地铁4号线的振动对颐和园北宫门的影响为研究背景,首先将场地及北宫门的振动实测结果与有限元结果对比,分析了实际运行工况下场地振动衰减规律以及古建筑木结构的振动响应,保证了有限元分析模型精度。进而运用单一变量的方法,建立了不同建筑长轴与线路夹角、运营车速共6种工况的有限元模型,系统地研究了不同影响因素对木结构古建筑振动响应的影响,得出以下结论:

(1)场地地表速度半峰峰值的模拟结果与实测结果衰减趋势相同,场地模拟的振动强度值由于未考虑背景振动的原因小于实测值,各拾振点的误差

均在10%~23%之间。

(2)北宫门各测点振动速度最大值小于规范限值,建筑各部分振动强度规律的模拟结果与实测大致相同,建筑振动强度从东北侧至西南侧呈减小的趋势,二层楼面振动强度是一层对应测点的2.3~4.5倍。

(3)地铁线路与临近木结构古建筑长轴方向夹角为 0° 时,结构振动强度最大,夹角为 90° 时,振动强度最小,且不同夹角下结构振动最强烈位置均出现在距地铁线路最近的结构柱位置,在对木结构古建筑维护检测时应重点关注。

(4)随着列车速度的增大,木结构古建筑的振动强度显著增大,与车速60 km/h时相比,车速为80 km/h时结构振动幅度增大19.67%。

参考文献:

- [1] 刘敦桢. 中国古代建筑史[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [2] 马蒙, 刘维宁. 我国文物建筑受列车微振动影响研究现状及关键问题分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(4): 1-6.
Ma Meng, Liu Weining. Overview and key problem analysis of the vibration influences on historic buildings induced by moving trains in China[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(4): 1-6.
- [3] Ma M, Liu W, Qian C, et al. Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 81: 58-74.
- [4] 李团社, 张建平. 西安地铁建设中的文物保护[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 21-24.
Li Tuanshe, Zhang Jianping. Preservation of cultural relics during metro construction in Xi'an city[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 21-24.
- [5] 巴振宁, 刘冰松, 张龙, 等. 环境振动下德和园大戏楼动力响应分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊1): 414-420.
Ba Zhenning, Liu Bingsong, Zhang Long, et al. Dynamic response analysis of the Grand Theater in the Garden of Virtuous Harmony under the environmental vibration[J]. Building Structure, 2018, 48(Sup 1): 414-420.
- [6] Fujikake T. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains[J]. Journal of Sound & Vibration, 1986, 111(2): 357-360.
- [7] Hayakawa K, Kani Y, Matsubara N, et al. Ground vibrations isolation by PC wall-piles[C]. International Conferences on Case Histories in Geotechnical Engineering. St. Louis, Missouri, USA, 1998: 671-677.

- [8] Pau A, Vestroni F. Vibration analysis and dynamic characterization of the colosseum[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2008, 15(8): 1105-1121.
- [9] Aras F, Krstevska L, Altay G, et al. Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace [J]. *Construction & Building Materials*, 2011, 25(1): 81-91.
- [10] Ellis P. Effects of traffic vibrations on historic buildings [J]. *Science of the Total Environment*, 1987, 59: 37-45.
- [11] Bazaco M, Montoya F, Alvarez V, et al. Traffic induced vibrations in historic buildings. Case of study: Palacio De Sta. Cruz of Valladolid [J]. *WIT Transactions on the Built Environment*, 1970, 17: 109-118.
- [12] 魏鹏勃. 城市轨道交通引起的环境振动预测与评估 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Wei Pengbo. Prediction and assessment for urban train-induced environmental vibrations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [13] 马蒙, 刘维宁, 刘卫丰. 列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展 [J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(3): 1-16.
Ma Meng, Liu Weining, Liu Weifeng. Research progress on prediction method and uncertainty of train-induced environmental vibration [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(3): 1-16.
- [14] 刘维宁, 马蒙, 刘卫丰, 等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(6): 547-559.
Liu Weining, Ma Meng, Liu Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2016, 46(6): 547-559.
- [15] 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, 2008.
MOHURD. Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452—2008 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [16] 张宝章, 刘德倜. 从清漪园到颐和园 [J]. *北京档案*, 2014(6): 54-57.
- [17] 国家铁路局. 钢轨 第1部分: 43 kg/m~75 kg/m 钢轨: TB/T 2344.1—2020 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
National Railway Administration of the PRC. Rails—part 1: 43 kg/m~75 kg/m rails: TB/T 2344.1—2020 [S]. Beijing: China Railway Press, 2020.
- [18] 周立. 地铁列车运行诱发环境振动的数值模拟与烦恼率评价 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
Zhou Li. Numerical Simulation and annoyance rate evaluation on environmental vibration induced by subway train operation [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [19] 施春花, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 地震动输入界面的选取对地震动参数的影响 [J]. *中国地震*, 2009, 25(3): 282-293.
Shi Chunhua, Lü Yuejun, Peng Yanju, et al. A Study on the influence of seismic wave inputting interface on ground motion parameters [J]. *Earthquake Research in China*, 2009, 25(3): 282-293.
- [20] Yang Y B, Kuo S R, Hung H H. Frequency-independent infinite elements for analysing semi-infinite problems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39(20): 3553-3569.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计标准: GB 50005—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
MOHURD. Standard for design of timber structures: GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.
- [22] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩, 等. 中国古代木结构有限元动力分析 [J]. *土木工程学报*, 2000, 33(1): 32-35.
Zhao Junhai, Yu Maohong, Yang Songyan, et al. Dynamic analysis for the ancient superstructure of the East City Gate of Xi'an by FEM [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(1): 32-35.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 古建筑木结构维护与加固技术标准: GB/T 50165—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
MOHURD. Technical standard for maintenance and strengthening of historic timber building: GB/T 50165—2020 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.
- [24] 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 中国古代大木作结构抗震构造研究 [J]. *世界地震工程*, 2004, 20(1): 100-104.
Gao Dafeng, Zhao Hongtie, Xue Jianyang. Aseismic carpentry of Chinese ancient timber buildings [J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(1): 100-104.
- [25] 苏军, 高大峰. 中国木结构古建筑抗震性能的研究 [J]. *西北地震学报*, 2008, 30(3): 239-244.
Su Jun, Gao Dafeng. Study on the seismic performance of Chinese ancient timber structure [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2008, 30(3): 239-244.
- [26] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界 [J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46-51.
Liu Jingbo, Wang Zhenyu, Du Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46-51.
- [27] 杨宜谦. 地铁和铁路环境振动源 [J]. *环境工程*, 2013,

- 31(增刊1): 654-658.
 Yang Yiqian. Environmental vibration sources of subways and railways[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(Sup1): 654-658.
- [28] 胡豹. 地铁车辆-隧道动力非线性耦合系统数值模拟方法与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
 Hu Bao. Numerical simulation method and application of metro vehicle-tunnel dynamic nonlinear coupled system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [29] 张玉娥, 白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3): 68-70.
 Zhang Yu'e, Bai Baohong. The method of identifying train vibration load acting on subway tunnel structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3): 68-70.
- [30] 张鹤年, 阳建强, 孙广俊, 等. 地铁运行诱发的环境振动数值模拟与模型预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 988-993.
 Zhang Henian, Yang Jianqiang, Sun Guangjun, et al. Numerical simulation and model prediction for environmental vibration induced by metro operation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 988-993.
- [31] 毛顺茂, 熊超华, 雷晓燕. 地铁运营对古建筑振动响应影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 13-17.
 Mao Shunmao, Xiong Chaohua, Lei Xiaoyan. Vibration impact on ancient architecture induced by subway running[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 13-17.
- [32] 王亚磊, 赵茂程, 王正. 国产油松、马尾松原木品质应力波法试验及其缺陷研究[J]. 林业机械与木工设备, 2014, 42(10): 30-34.
 Wang Yalei, Zhao Maocheng, Wang Zheng. Stress wave method-based test of the quality of domestic Chinese pine and masson pine log and study on their defects [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2014, 42(10): 30-34.

Measurement and analysis of the influence of metro train vibration on the ancient wooden structures of North Palace Gate of the Summer Palace

BA Zhen-ning¹, FU Zhan-yuan¹, FU Ji-sai¹, MA Ming-hao², GAO Yu-hui²

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2.Tianjin International Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the existing circumstances that the North Palace Gate of the Summer Palace and Beijing Rail Transit Line 4, this paper mainly discusses the influence of metro train vibration on ancient wooden structures. A train-tunnel-soil layer-building coupled model is established by ABAQUS, and the accuracy of the model is validated by comparison with field measurements. Horizontal vibration intensities are analyzed and the effects of angle and distance between subway lines and buildings, train speed and tunnel depth on ancient wooden structures are summarized. The results show that the structural vibration intensity becomes largest when the subway line is coincident with the long axis of the ancient timber structure. The structural column closest to the subway line exhibits the strongest vibration for various angles. The vibration intensity of buildings increases significantly as the train speed increases, with the vibration amplitude increasing by 19.67% for 80 km/h in comparison to the case of 60 km/h. The embedded depth of the tunnel is suggested as deep as possible when the location of the subway line cannot be changed.

Key words: ancient wooden structure; metro train; field measurement; finite element analysis; vibration influence

作者简介: 巴振宁(1980—),男,博士,教授。E-mail: bazhenning_001@163.com。