

# 交通荷载作用下古建筑木结构柱顶水平速度计算研究

胡卫兵<sup>1,2</sup>, 杨 佳<sup>1</sup>, 吴严辉<sup>1</sup>, 孟昭博<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省结构与抗震重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:**我国《古建筑防工业振动技术规范》中规定在对古建筑木结构进行评估时用古建筑木结构顶层柱顶容许水平振动速度作为评估参数,但在实际工程中,顶层柱顶的速度难以测试,而一层或二层等底层柱顶的水平振动速度通常比较容易测试.论文对交通荷载作用下古建筑木结构进行分析,将古建筑木结构简化为剪切悬臂杆模型,利用最小势能原理建立了结构的侧移形状函数,利用形状函数建立了交通荷载作用下古建筑木结构柱顶水平振动速度幅值和各层水平振动速度幅值转换关系;论文通过对光岳楼在地面交通激励作用下进行了现场测试,验证了古建筑木结构柱顶水平速度幅值计算方法,为木建筑木结构的安全性评估提供了快速方法.

**关键词:**古建筑木结构;最小势能原理;速度换算;交通荷载

**中图分类号:** TU366.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)03-0315-06

## The calculation of ancient wooden pillars horizontal velocity under the traffic load

HU Weibing<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>1</sup>, WU Yanhui<sup>1</sup>, MENG Zhaobo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Lab of Structure and Earthquake Resistance(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. School of Architecture & Civil Engineering, Liao Cheng University, Shandong Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** According to the national standard, the security assessment of ancient timber structure was evaluated by horizontal vibration velocity of the top column, but it's difficult to obtain horizontal vibration velocity of the top column. It's easy to get one or two layers and underlying columns of horizontal vibration velocity. The paper, based on the principle of minimum potential energy, analyzes lateral shape function of ancient timber structure to deduce the conversion methods of vibration velocity between the top and underlying columns of ancient timber structure. Besides, the thesis conducted a live test for Guangyue tower under the action of traffic load and demonstrated the conversion relation about horizontal vibration velocity of top column, which supplied a immediate method for the security assessment of ancient timber structure.

**Key words:** history timber structure; the minimum potential energy principle; conversion speed; traffic load

中国古建筑具有极高的历史、文物、艺术和科学研究价值,是我国灿烂文明史的重要组成部分.然而,长期受到风雨侵蚀、战争、地震等环境和人为破坏的影响,古建筑的材料和结构性能都会有不同程度的损伤.特别是随着我国城市化建设的快速发展,铁路、公路、地铁等基础设施建设的发展也越来越快,现代交通运行过程中产生的激励作用对途经的古建筑不可避免的产生影响.尽管交通车辆运行过程中引起的振动不像地震那样剧烈,但其作用是长期的、反复的,当振动造成

的古建筑结构的动应变达到或超过其所能承受的最大容许动应变时,就会引起交通沿线古建筑结构发生破坏;同时,长期的振动作用可能会造成地基的沉降不均匀,均可能对古建筑结构的安全形成威胁.交通车辆振动对古建筑产生的影响可能多年累计才能显现出来,但造成的损失及破坏无法弥补.因此,正确评价交通振动激励对古建筑的影响,进一步制定相应的保护措施已是亟待解决的问题.

交通激励对环境的作用及对古建筑的影响,

国内外已经开展了大量的研究工作,夏禾、刘维宁教授课题组对环境振动问题进行了深入的研究,系统的研究了铁路交通引起的地面振动及对建筑物的影响<sup>[1-2]</sup>。楼梦麟、丁洁民教授课题组通过理论研究和现场监测对地铁及轻轨列车引起的环境振动进行了研究<sup>[3]</sup>。王柏生教授课题组近年来对交通引起的环境振动对建筑物的影响问题开展了一系列的研究工作<sup>[4]</sup>。陶连金、闫维明教授课题组通过现场监测和分析研究了北京地铁振动对周围建筑物的影响<sup>[5]</sup>。孟昭博<sup>[6]</sup>通过现场实测对西安钟楼在交通激励作用下的影响进行了评估,在对西安钟楼的交通振动响应分析与评估研究中,利用线性关系通过已测得的一层柱顶水平振动速度换算成顶层柱顶水平振动速度,但离规范要求的精度还有差距。

对于振动对建筑物的影响,世界各国都制定了相应的规范要求,大都是给出振动速度及频率容许值。我国针对于古建筑保护制定了《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T50452-2008)<sup>[7]</sup>。规范中对于古建筑木结构采用顶层柱顶水平振动速度幅值作为容许振动指标,容许振动指标是根据木材的顺纹弹性波速和古建筑的保护级别不同等给出的,一般要求顶层柱顶水平振动速度幅值控制在0.18~0.35 mm/s之间。规范中对古木建筑安全是依据顶层柱顶水平振动速度幅值来进行评估,但在实际工程检测中由于种种原因顶层柱顶水平振动速度幅值难以准确的测量,而一层或二层等底层柱顶的水平振动速度幅值通常比较容易测试,因此有必要建立古建筑木结构顶层柱顶水平振动速度幅值与底层柱顶速度幅值之间的关系,解决通过一层或二层等底层柱顶的水平振动速度幅值计算出顶层柱顶水平振动速度幅值的问题。本文采用最小势能原理推导出木结构柱顶水平振动速度幅值与其余各层水平振动速度幅值转换关系,通过该转换关系可以计算出其它各层柱顶水平振动速度幅值,并通过对光岳楼在地面交通激励作用下进行现场测试,验证了论文推导的古建筑木结构柱顶水平振动速度幅值转换关系及计算方法,为在交通荷载作用下木建筑木结构的安全性评估提供了快速方法。

## 1 木结构控制点振动速度的转换关系

### 1.1 古木结构的力学模型及势能泛函数

对于古木结构而言,在工业振动引起的波动

应力作用下,各部分的振动具有相同的频率,且整个结构的振动形成一个完整的空间振动,其振型曲线接近剪切型振动曲线。文献[9]在单层殿堂、亭子计算时采用等截面剪切悬臂杆模型;两层楼阁计算时采用阶形截面剪切悬臂杆模型;两层以上的楼阁包括木塔计算时采用变截面剪切悬臂杆模型。本文将古建筑木结构简化为剪切悬臂杆模型进行计算。

多层古建筑木结构建筑,木结构梁柱采用半刚性连接,屋顶采用厚重的屋盖,围护结构采用填充墙,结构形式为木框架结构。本文采用变截面剪切悬臂杆对古建筑木结构进行模拟分析,如图1所示。古建筑木结构在水平荷载作用下的变形主要由两部分组成:一是由于古建筑木结构层间剪力使梁、柱发生的弯曲变形;二是由于古建筑木结构层间构件的相互错动及楼板平动而产生的整体剪切变形。在交通激励荷载作用下,古建筑木结构楼层的水平剪力会随着木结构层数的增加而逐渐增大,即底部楼层柱底的水平剪力最大,顶层柱顶的水平剪力最小,如图1所示。为了方便建立木结构势能泛函数,本文对交通随机激励荷载产生的层间剪力进行简化,可根据底部弯矩相等或结构底部剪力相等的原则将对荷载对木结构的作用力简化成三角形分布形式,如图1所示。在三角形荷载作用下,木结构变截面剪切悬臂杆任意一点的应力分量 $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ,  $\sigma_x \neq 0$ ,  $\tau_{xy} \neq 0$ <sup>[10]</sup>。对于平衡状态的弹性体,剪切悬臂杆在该点处的应变能 $U$ :

$$U = \iiint \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV \\ = \iint \left( \frac{\sigma_x^2}{2E} dA_i \right) dx + \iint \left( \frac{\tau_{xy}^2}{2G} dA_i \right) dx \quad (1)$$

式中:  $A_i$  为古建筑木结构各层等效截面面积;等式右侧第一项表示弯曲变形产生的应变能,第二项表示剪切变形产生应变能。

由于古建筑木结构在水平荷载作用下的变形主要是以剪切变形为主,剪切变形产生应变能较大,而弯曲变形产生的应变能比较小,因此本文只考虑木结构的剪切变形<sup>[10]</sup>。

$$U = \iiint \frac{1}{2} \tau_{xy} \gamma_{xy} dV = \iint \left( \frac{\tau_{xy}^2}{2G} dA_i \right) dx \quad (2)$$

对于古建筑木结构的势能由两部分组成:结构剪切变形产生的势能和外荷载产生的势能。在图1所示模型中,设任意一点结构所受到的作用力为



$$V_{\max}(x) = \frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_i} \omega \left[ -\left(\frac{x}{H}\right)^3 + 3\left(\frac{x}{H}\right) \right] \quad (20)$$

## 2 光岳楼现场实验验证

### 2.1 光岳楼概况现场实测

为了验证本文推导的木结构控制点速度换算公式,对聊城光岳楼在地面交通荷载作用下进行了实测,并对各控制点及顶层柱顶振动速度进行换算分析.光岳楼位于聊城古城中央由高台基和上部木结构两部分组成,建于1374年.高台基为正四棱台,下底边长34.43 m,上边长31.62 m,高为9.38 m,四面各有一半圆拱门,中心处为十字拱相交形式.拱门面宽5.76 m,直线段高度为2.90 m,矢高为2.88 m.南向拱门两侧又各有一小拱门,与中间拱门相似.敞轩东西朝向,楼梯在高台基的出口处.上部木结构位于高台基中央,如图2所示.光岳楼木结构总共有4层,通过现场实测可知一到四层的层高分别为6.8 m、4.4 m、3.6 m、4.4 m,总高度为21.54 m.

对光岳楼在地面交通荷载作用下实测为连续性测试,光岳楼形状比较规则,结构对称,因此

$$\begin{aligned} V_1(6.8, t_1) &= \frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_1} \omega \left[ -\left(\frac{6.8}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{6.8}{21.54}\right) \right] \cos \omega t_1; \\ V_4(19.2, t_2) &= \frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_4} \omega \left[ -\left(\frac{19.2}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{19.2}{21.54}\right) \right] \cos \omega t_2; \\ \frac{V_{1\max}(6.8)}{V_{4\max}(19.2)} &= \frac{\frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_1} \omega \left[ -\left(\frac{6.8}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{6.8}{21.54}\right) \right]}{\frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_4} \omega \left[ -\left(\frac{19.2}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{19.2}{21.54}\right) \right]} = \frac{-\left(\frac{6.8}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{6.8}{21.54}\right)}{-\left(\frac{19.2}{21.54}\right)^3 + 3\left(\frac{19.2}{21.54}\right)} = \frac{0.9173}{1.9659}; \\ V_{4\max}(19.2) &= \frac{1.9659}{0.9173} V_{1\max}(6.8) \end{aligned}$$

同理,利用式(20)可以计算出二层柱顶、三层柱顶的水平振动速度幅值.通过该换算公式的计算,可以快速的计算出光岳楼木结构顶层柱顶水平振动速度幅值.

以一层柱顶的实测值为换算基数,采用式(20)进行其它各层柱顶水平振动速度幅值换算,其换算结果如表1第二行所示.

表1 实测值与计算值比较

Tab. 1 Measured value compared with the theoretical value

层号	一层 柱顶	二层 柱顶	三层 柱顶	四层 柱顶
实测值/mm	0.143	0.231	0.311	0.336
理论值/mm	0.143	0.222	0.271	0.307
差值百分比/%	—	3.9	12.9	8.6

由表1可见,光岳楼木结构各层柱顶水平振动

选取了整个结构的1/4进行现场监测,共布置61个测点,其中水平振动47个测点,竖向振动14个测点.每层柱顶都设置有8个传感器,图3所示为一层柱顶测点布置位置图.测试时间段选在中午12:00~14:00,下午5:30~7:30两个时间段.通过对光岳楼的现场监测,获取了大量的实测数据,本文只选取其中一层柱顶50 s的实测数据进行分析,图4所示为一层柱顶的速度时程.在进行数据采集时,由于各种因素的影响,采集的数据与光岳楼的真实振动存在一定偏差.为了消除偏差获得相对比较真实的数据,本文对实测数据进行了消除趋势和数字滤波处理,得出各层柱顶水平振动速度幅值,如表1第一行所示.

### 2.2 柱顶水平振动速度换算验证

通过现场测试已测得光岳楼在地面交通荷载作用下一层柱顶水平振动速度为 $V_{1\max}$ ,可通过公式(20)求得顶层柱顶水平振动速度 $V_{4\max}$ ,由于光岳楼木结构各层柱的等效截面面积相差不大,近似认为 $A_1 \approx A_2 \approx A_3 \approx A_4$ ,一层和四层的柱顶水平振动速度幅值换算如下.

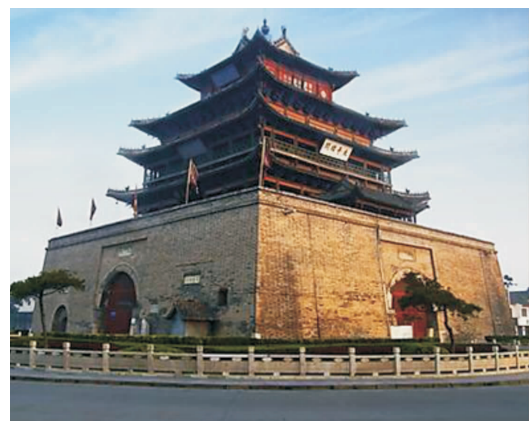


图2 光岳楼

Fig. 2 Guangyue tower

速度幅值计算值和实测值相差百分比分别3.9%、12.9%、8.6%,可看出顶层柱顶的水平振动速度幅值实测值和理论值非常接近.同时随着光岳楼木

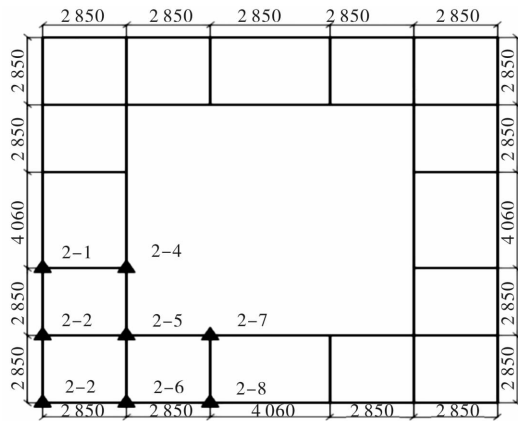


图3 一层柱顶测点布置图

Fig. 3 Measuring points on the first floor top column

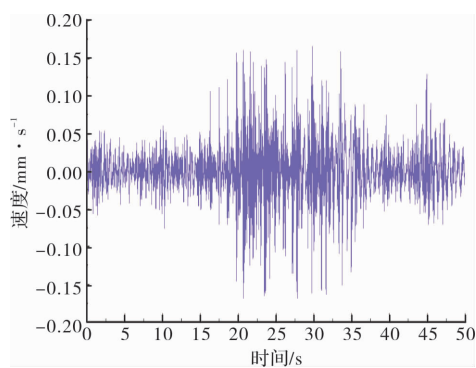


图4 一层柱顶测点 2-5 EW 向水平速度时程曲线

Fig. 4 Velocity time history curve of measuring point 2-5 in EW direction

结构层数的增加,其柱顶水平振动速度幅值也相应的增大,其中顶层柱顶水平振动速度幅值最大,符合木结构在车辆荷载作用下的振动响应规律.因此,本文通过速度换算对古建筑木结构柱顶水平振动速度幅值计算是合理的,为古建筑木结构在交通荷载作用下顶层柱顶水平振动速度幅值的精确求解提供参考,同时可以快速的对古建筑木结构进行安全性评估,为古木结构的保护和修缮提供了依据.

### 3 结论

本文采用最小势能原理,推导出了木结构各层柱顶水平振动速度幅值转换关系,通过该转换关系可以计算出顶层柱顶水平振动速度幅值.通过对光岳楼现场实测结果与本文计算方法计算结果进行对比,对本文提出的计算方法进行了验证.主要结论如下:

(1) 本文将古建筑木结构简化为剪切悬臂杆模型进行分析,利用最小势能原理推导出了木结构

各层顶层柱顶水平振动速度幅值为

$$V_{\max}(x, t) = \frac{Y_0 \mu_s^2 q H^2}{6GA_i} \omega \left[ -\left(\frac{x}{H}\right)^3 + 3\left(\frac{x}{H}\right) \right]$$

通过比值换算的方法,在已知任一层柱顶水平振动速度幅值的情况,可以计算出其它层柱顶的水平振动速度幅值,也可以计算出古建筑木结构的顶层柱顶的水平振动速度幅值.

(2) 通过对光岳楼现场实测结果与本文计算方法计算结果进行对比分析可得,本文推导的古建筑木结构水平振动速度幅值换算关系及顶层柱顶水平振动速度幅值的计算结果可信,其精度能够满足工程要求,可以通过本文方法计算快速的对古建筑木结构进行安全性能评估,具有一定的工程应用价值.

### 参考文献 References

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社,2010.  
XIA He. Traffic induced environmental vibrations and controls[M]. Beijing:Science Press,2010.
- [2] 马蒙. 基于敏感度的地铁列车振动环境影响预测及动态评价体系研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.  
MA Meng. Study on the prediction of metro train-induced vibrations based on sensitivity of environmental influence and design stage-accompanied evaluation system[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [3] 贾旭鹏. 地铁运行振动的传播规律和对地面建筑的影响[D]. 上海:同济大学,2008.  
JIA Xupeng. Study on vibration caused by subway and its impact for buildings[D]. Shanghai:Tongji University,2008.
- [4] 徐仲杰. 预测列车对拟建建筑物的振动影响[D]. 杭州:浙江大学,2007.  
XU Zhongjie. Predicting proposed buildings vibrations induced by trains[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2007.
- [5] 聂晗, 闫维明, 高小旺, 等. 地铁交通诱发邻近建筑物振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(1):51-58.  
NIE Han, YAN Weiming, GAO Xiaowang, et al. In situ experiment and analysis of adjacent buildings vibration induced by urban subway transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(1):51-58.
- [6] 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. Traffic vibration response analysis and assessment of the Xi'an bell tower[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [7] 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/T50452-2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- 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/T50452-2008[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [8] 白顶有,王泽军,冯伟,等. 框架结构侧移曲线的泛函推导和目标位移确定[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 203-204
- BAI Dingyou, WANG Zejun, FENG Wei, et al. The functional derivation and the target displacement curve determination of frame structure[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 203-204.
- [9] 潘复兰. 古建筑防工业振动的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2008, 20(8): 104-105.
- PAN Fulan. Research on anti industrial vibration of ancient architecture[J]. Sciences of conservation and Archaeology. 2008, 20(8): 104-105.
- [10] 徐杏华. 基于最小势能原理的悬臂梁弯曲研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2009, 25(1): 12-13.
- XU Xinhua. Research on bending of the cantilever based on the principle of inimum potential energy[J]. Journal of Shaanxi University of Technolgy (Natural Science Edition), 2009, 25(1): 2-13.
- [11] 蒋欢军,李培振. 钢筋混凝土框架结构的最大地震位移形状曲线[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 581-582.
- JIANG Huanjun, LI Peizhen. the largest earthquake displacement curve shape of Reinforced concrete frame structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(5): 581-582.
- [12] 梁兴文,邓明科,李晓文. 钢筋混凝土高层建筑基于移的抗震设计方法研究[J]. 建筑结构. 2006, 36(7): 16-17.
- LIANG Xinwen, DENG Mingke, LI Xiaowen. The research of seismic design method based on the displacement of the reinforced concrete high-rise building[J]. Architectural Structure. 2006, 36(7): 16-17.
- [13] 张岩,杨娜. 环境激励下古建筑木结构模态参数识别与分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010(9): 291-295.
- ZHANG Yan, YANG Na. The structure modal parameter identification and analysis of environmental stimulus on the ancient timber structure[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010(9): 291-295.
- [14] 曾建. 交通激励作用下西安钟楼动力特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- ZENG Jian. The dynamic characteristics analysis of Xi'an Bell Tower under traffic incentives[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [15] 孟昭博,袁俊,吴敏哲. 行驶车辆对西安钟楼木结构微振动影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(4): 512-517.
- MENG Zhaobo, YUAN Jun, WU Minzhe. Experiment investigation of micro-vibration in wooden structure of Xi'an Bell Tower caused by traffic vehicle[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2009, 41(4): 512-517.
- [16] 吴严辉. 交通荷载作用下古木结构控制点振动规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
- Wu Yanhui. The vibration velocity conversion research of ancient structure control point under the action of traffic load[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.

(编辑 吴海西 沈 波)