

基于 ITD 法的光岳楼木结构模态参数识别^①

裴冉冉 孟昭博 张保良 赵庆双

(聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要 结构模态参数识别是结构动力响应分析的前提和基础,其中自振频率是反应结构动力特性的重要模态参数指标.因此,准确计算自振频率是分析光岳楼的动力反应的关键.本文依据泰斯特动态监测设备实测测点的振动数据,采用 ITD 法计算得到了光岳楼木结构的自振频率,并与 STD 法和 OP. Polylscf 算法计算得到的光岳楼木结构的自振频率进行了比较.研究表明:采用 ITD 法和 STD 法计算得到的光岳楼木结构的第 1 阶频率比较接近,但与 OP. Polylscf 算法计算得到的光岳楼木结构的 1 阶频率相比略偏小,这主要由于光岳楼历经多次维修加固,致使其整体刚度有所增大.而采用 ITD 法和 STD 法计算光岳楼木结构的其他各阶频率均大于采用 OP. Polylscf 算法的计算结果,除了第 3 阶频率的误差大于 10% 外,其余各阶误差均小于 10%,说明采用 ITD 法计算光岳楼木结构的自振频率具有较高的精度.

关键词 ITD 方法;光岳楼木结构;模态参数识别;自振频率

中图分类号 TU366.2

文献标识码 A

0 引言

聊城光岳楼亦称“余木楼”,始建于公元 1374 年,历经六百多年的风雨侵蚀、温度和湿度的周期变化、地震灾害及维修管理不善等影响,内部结构存在不同程度的损伤.另一方面,快速发展的交通工具在方便人们运输的同时,交通车辆在行驶过程中引起的微振动(交通激励)成为光岳楼木结构损伤的最大威胁之一.欲评估交通激励对光岳楼木结构的影响,了解其结构现状至关重要,其中准确确定光岳楼木结构的模态参数是进行结构动力反应分析的前提和基础.模态参数识别方法包括频域法和时域法.频域法是采用实测的频率响应数据或曲线,根据频响函数模求解系统模态参数.时域法是采用结构的位移、速度或加速度来识别其模态参数,包括 STD 法、RTD 法、ITD 法等.孟昭博等分别采用 ITD 法和 STD 求得了西安钟楼和聊城光岳楼的自振频率^[1,2];曾建采用 ITD 法对西安钟楼进行了模态参数分析^[3];杜飞平通过采用 ITD、STD 法计算液体火箭发动机的自振频率,并进行了对比分析^[4];张艳辉采用 ITD 法识别出了一座混凝土连续梁桥数值模型的模态参数^[5];狄生奎等基于对重点实验室的十二层钢筋混凝土框架模型振动台试验数据,采用 ITD 法分析了其模态参数^[6].本文欲采用 ITD 法分析光岳楼木结构的模态参数,为后续的结构动力反应分析提供依据.

1 测点布置

为考察地面交通振动在土体中的传播规律、在光岳楼台基中的衰减规律以及在上部木结构各层水平

^① 收稿日期:2017-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51378245);山东省研究生教育创新计划项目(DYY16102);山东省本科高校教学改革研究项目资助

通讯作者:孟昭博,男,汉族,博士,教授,研究方向:古建筑结构、装配式结构等,E-mail:mengzhaobo@lcu.edu.cn.

和竖向的振动水平,考虑到测试仪器及测试现场的具体情况,以《古建筑防工业振动技术规范》^[7]为依据,参照我国《城市区域环境振动测量方法》^[8]对测点布置的要求来布置测点.

《古建筑防工业振动技术规范》中 7.1.2 条规定:古建筑结构动力特性和响应的测试,当结构对称时,可按任一主轴水平方向测试;当结构不对称时,应按各个主轴水平方向分别测试.由于光岳楼环道、高台基以及木结构全部为对称结构,考虑到无线信号的接收问题,取整个结构的四分之一进行测试.选定 1 个测点作为参考点,分层布置各测点,共计 71 个.其中环道及高台基的测点数为 14 个,上部木结构的测点数为 57 个.以楼层为单位分批次进行振动测试,每个测点的测试时间不少于 30 min.

测点的具体布置如下(图 1-5 中上方为北),图 6 为现场测试照片.

(1) 环道测点为图 1 中的①、②、③、④;台基底部测点(图 1 中⑤、⑥、⑦、⑧)即为环道相应测点向台基底部收缩;台基顶部测点与底部测点相同;同上,上部木结构墙角的测点(图 1 中⑨、⑩、⑪、⑫)即为台基顶部相应测点向木结构主楼收缩.

(2) 上部木结构一层柱底的测点布置见图 2,设置 8 个测点,为 1-1~1-8 一层柱顶的测点布置与柱底相同.

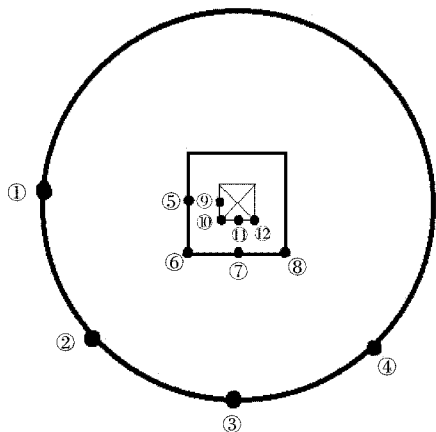


图 1 环道、台基、墙角测点布置图

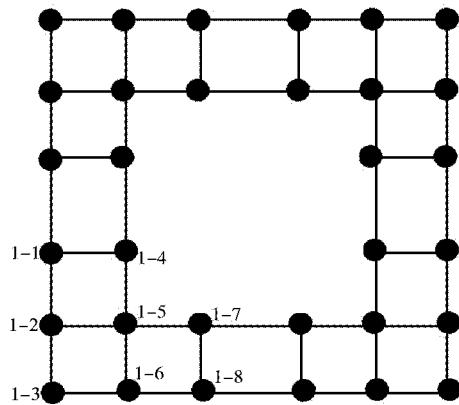


图 2 一层柱顶、底测点布置图

(3) 二层柱顶测点布置见图 3,为 2-1~2-8.

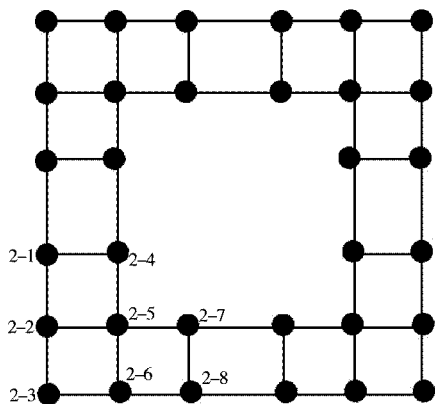


图 3 二层柱顶测点布置图

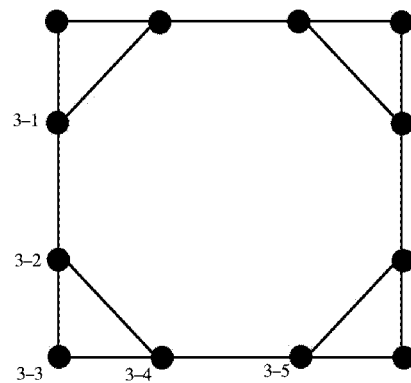


图 4 三层柱顶测点布置图

(4) 三层柱顶测点布置见图 4,为 3-1~3-6.

(5) 光岳楼四层柱与下层的柱错位存在,金柱于三层的梁上升起.测点布置见图 5,为 4-1~4-5.

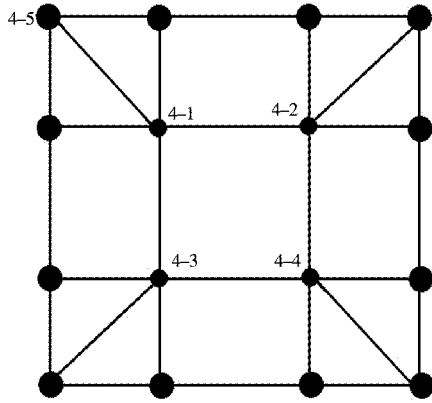


图 5 四层柱顶测点布置图

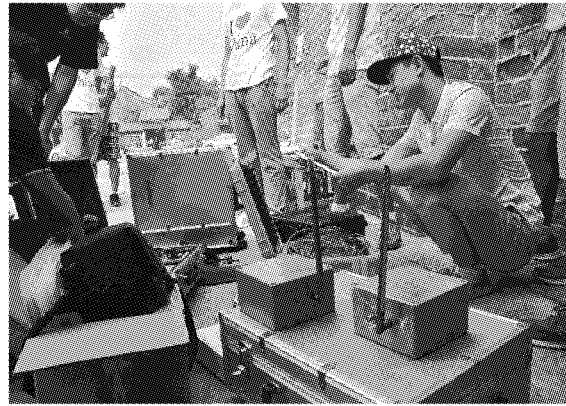


图 6 现场测试照片

2 测试数据及处理

由于监测时间较长,测点较多,所得数据较多,故仅给出四层顶测点 4-1 部分时段的速度时程曲线,其中横坐标为时间(单位:s),纵坐标为振动速度(单位:mm/s).

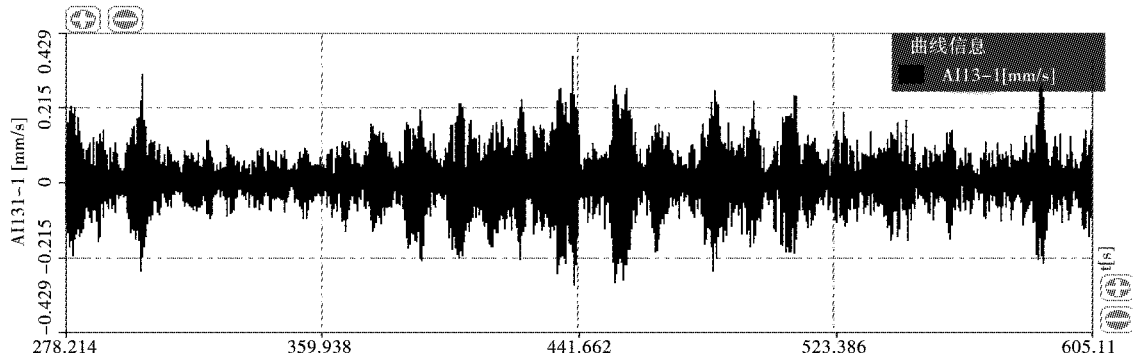


图 7 四层顶测点 SN 向时域波形

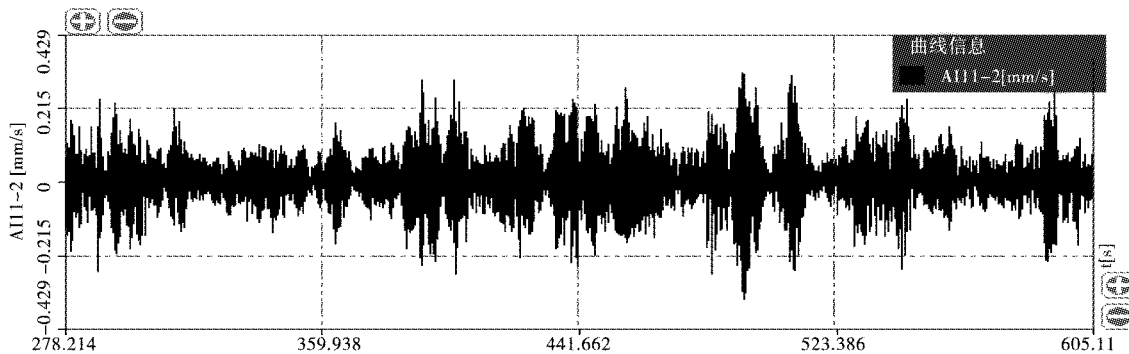


图 8 四层顶测点 EW 向时域波形

由于测试过程中外部和内部因素导致信号输出时可能会夹杂着许多噪声成分,在模态参数识别前需要对测试数据进行预处理。本文采用 Matlab 软件通过平滑处理、消除趋势项、频域滤波三个步骤来对所采集信号进行预处理。其中,平滑处理可以消除混杂于信号中的高频噪声的干扰和影响,消除趋势项可将由于基线偏离所造成的波形畸变加以修正,频域滤波可以滤除监测信号中的噪声或虚假成分、提高信噪比、抑制干扰信号、分离频率成分等。

3 ITD 法模态参数识别

ITD 法(The Ibrahim Time Domain Technique)是采用结构自由振动响应的位移、速度或加速度时域

信号进行模态参数识别的方法,该法基于粘性阻尼线性多自由度系统的自由衰减响应可以表示为其各阶模态的组合作为基础理论.将各测点自由衰减响应信号进行三次不同延时采样,从而建立结构自由响应采样数据的增广矩阵,即自由衰减响应数据矩阵,然后根据响应与特征值的复指数关系,建立特征矩阵的数学模型,求解其特征值和特征向量.最后根据模型特征值与振动系统特征值的关系,得到系统的模态参数^[9,10].

多自由度体系的自由振动响应的运动微分方程可表示为

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = 0. \quad (1)$$

假定式(1)的解的形式为

$$\mathbf{x}(t)_{N \times 1} = \Phi_{N \times 2N} e^{s_r t}_{2N \times 1}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t)]^T$; $\Phi = [\{\varphi_1\} \ \{\varphi_2\} \ \cdots \ \{\varphi_{2N}\}]$, $\{e^{s_r t}\} = [e^{s_1 t} \ e^{s_2 t} \ \cdots \ e^{s_{2N} t}]^T$, 式中 $\mathbf{x}(t)$ 为体系的自由振动响应向量; Φ 为体系的特征向量矩阵; s_r 为体系的第 r 阶特征根; N 为体系的自由度数,也是体系的模态阶数.

将式(2)代入式(1)得

$$(s^2 M + sC + K)\Phi = 0. \quad (3)$$

对于小阻尼的线性体系,方程(3)特征根 s_r 是复数,并以共轭复数的形式成对出现,即

$$\begin{cases} s_r = -\xi_r \omega_r + j\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}, \\ s_r^* = -\xi_r \omega_r - j\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 ω_r 为对应第 r 阶动力的固有圆频率; ξ_r 为对应的阻尼比.

于是体系的第 i 测点在 t_k 时刻的自由振动响应可表示为各阶模态响应的集合形式

$$x_i(k) = \sum_{r=1}^N (\varphi_{ir} e^{s_r t_k} + \varphi_{ir}^* e^{s_r^* t_k}) = \sum_{r=1}^M \varphi_{ir} e^{s_r t_k}, \quad (5)$$

式中 φ_{ir} 为 r 阶振型向量 $\{\varphi_r\}$ 的第 i 分量,并且设 $\varphi_{r(N+r)} = \varphi_{ir}^*$, $s_{N+r} = s_r^*$; M 为系统自由度数的 2 倍,即 $M = 2N$.

设被测体系中共有 n 个实际测点,根据随机减量法得到 L 个时刻的体系自由振动响应值,且 L 比 M 大的多.通常实际测点数小于体系自由度数的 2 倍(即 M).为了使测点数等于 M ,采用延时方法由实际测点构造虚拟测点.延时取为采样时间间隔 Δt 的整数倍.若令该整数倍为 1,则虚拟测点的自由振动响应可表示为

$$\begin{cases} x_{i+n}(t_k) = x_i(t_k + \Delta t), \\ x_{i+2n}(t_k) = x_i(t_k + 2\Delta t), \\ \vdots \end{cases} \quad (6)$$

这样即可得到实际测点和虚拟测点组成的 M 个测点在 L 个时刻的自由振动响应值所建立的响应矩阵 \mathbf{X} , 即

$$\mathbf{X}_{M \times L} = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_L) \\ x_2(t_1) & x_2(t_2) & \cdots & x_2(t_L) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n(t_1) & x_n(t_2) & \cdots & x_n(t_L) \\ x_{n+1}(t_1) & x_{n+2}(t_2) & \cdots & x_{n+1}(t_L) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M(t_1) & x_M(t_2) & \cdots & x_M(t_L) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

令 $x_{ik} = x_i(t_k)$, 并将(5)代入(7),可得响应矩阵的关系式

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1L} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{ML} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1M} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{M1} & \varphi_{M2} & \cdots & \varphi_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{s_1 t_1} & e^{s_1 t_2} & \cdots & e^{s_1 t_L} \\ e^{s_2 t_1} & e^{s_2 t_2} & \cdots & e^{s_2 t_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{s_M t_1} & e^{s_M t_2} & \cdots & e^{s_M t_L} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式(8)可简写为

$$\mathbf{X}_{M \times L} = \mathbf{\Phi}_{M \times M} \mathbf{\Lambda}_{M \times L}. \quad (9)$$

将包括虚拟测点在内的每一个测点延时 Δt , 则由式(5)可得

$$\tilde{\mathbf{x}}_i(t_k) = \mathbf{x}_i(t_k + \Delta t) = \sum_{r=1}^{2N} \boldsymbol{\varphi}_{ir} e^{s_r(t_k + \Delta t)} = \sum_{r=1}^{2N} \boldsymbol{\varphi}_{ir} e^{s_r \Delta t} e^{s_r t_k} = \sum_{r=1}^{2N} \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{ir} e^{s_r t_k}, \quad (10)$$

其中

$$\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{ir} = \boldsymbol{\varphi}_{ir} e^{s_r \Delta t}. \quad (11)$$

由 M 个测点在 L 个时刻的响应所构成延时 Δt 的响应矩阵可表示为

$$\tilde{\mathbf{X}}_{M \times L} = \tilde{\mathbf{\Phi}}_{M \times M} \mathbf{\Lambda}_{M \times L}, \quad (12)$$

由式(11), 可将式(12)表示为

$$\tilde{\mathbf{\Phi}}_{M \times M} = \mathbf{\Phi}_{M \times M} \boldsymbol{\alpha}_{M \times M}, \quad (13)$$

式中 $\boldsymbol{\alpha}$ 为对角矩阵, 其对角线上的元素为 $\boldsymbol{\alpha}_r = e^{s_r \Delta t}$.

将式(12)代入(9)可得

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{\Phi} \boldsymbol{\alpha} \mathbf{\Lambda}, \quad (14)$$

由式(7)和式(8)消去 $\mathbf{\Lambda}$, 经过整理得

$$\mathbf{A} \mathbf{\Phi} = \mathbf{\Phi} \boldsymbol{\alpha}, \quad (15)$$

式中矩阵 \mathbf{A} 为方程 $\mathbf{A} \mathbf{X} = \tilde{\mathbf{X}}$ 的单边最小二乘解.

矩阵 \mathbf{A} 的第 r 阶特征值为 $e^{s_r \Delta t}$ 相应特征向量为特征向量矩阵 $\mathbf{\Phi}$ 的第 r 列. 设求得特征值 V_r 为

$$V_r = e^{s_r \Delta t} = e^{(-\xi_r \omega_r + j \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}) \Delta t}, \quad (16)$$

于是可求得体系的频率 ω_r , 即

$$\omega_r = \frac{|\ln V_r|}{\Delta t}. \quad (17)$$

2 ITD 法自振频率计算

根据文献[11]测得的光岳楼木结构二层柱顶(工况 1)和三层柱顶(工况 2) x 向振动速度响应, 经过频域积分得到的位移时程曲线(图 9、10 中虚线示出, 单位: mm), 图 9、10 中实线为采用 Matlab 软件编程, 利用 ITD 法拟合的位移时程曲线.

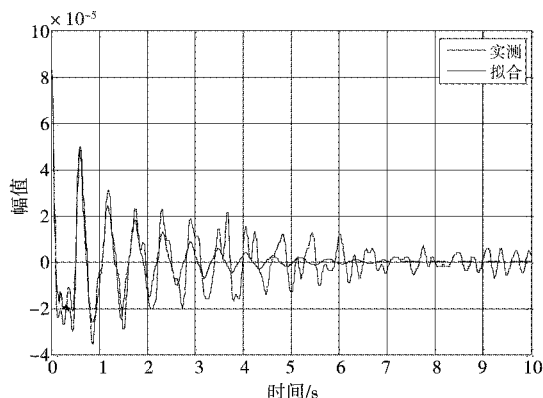


图 9 工况 1 用 ITD 法拟合的位移时程曲线

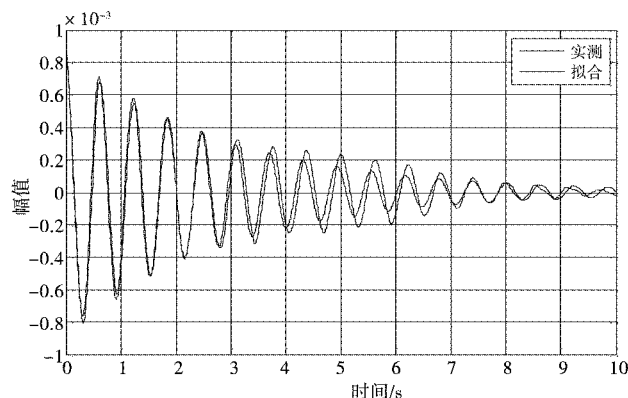


图 10 工况 2 用 ITD 法拟合的位移时程曲线

根据图 9 和图 10 可以看出,采用 ITD 法拟合的结构振动响应曲线与现场监测得到的结构振动响应曲线比较吻合,即 ITD 法提取的光岳楼木结构振动响应数据与实测值比较接近,因此,采用 ITD 法可以较好的分析聊城光岳楼木结构的模态参数。

表 1 为依据工况 1 和工况 2 的实测振动数据,采用 ITD 法求得光岳楼木结构的自振频率及其平均值。

表 1 ITD 法计算的光岳楼木结构自振频率/Hz

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
工况 1	1.592	3.241	4.109	6.122	7.295	8.273
工况 2	1.625	3.183	4.279	6.120	7.242	8.057
平均值	1.608	3.212	4.194	6.121	7.268 5	8.165

3 计算结果分析

本文采用 ITD 法与文献[2]采用 STD 法和文献[12]采用 OP. Polylscf 算法计算得到的光岳楼木结构的自振频率如表 2 所示。

表 2 三种方法计算得到的光岳楼木结构自振频率/Hz

阶次	1	2	3	4	5	6
ITD 法	1.608	3.212	4.194	6.121	7.268 5	8.165
STD 法	1.613	3.266	3.837	5.969	7.089	7.728
OP. Polylscf 法	1.637	3.170	3.630	5.872	6.934	7.604

由表 2 可知,采用 ITD 法和 STD 法计算得到的光岳楼木结构第 1 阶频率比较接近,但与 OP. Polylscf 算法得到的光岳楼木结构第 1 阶频率相比略偏小,其主要原因是光岳楼经过多次维修加固,其整体刚度增大所致。而采用 ITD 法和 STD 法计算光岳楼木结构的其他各阶频率均大于采用泰斯特软件的分析结果,除了第 3 阶频率的误差大于 10%外,其余各阶误差均小于 10%,说明采用 ITD 法计算木结构的自振频率具有较高的精度。

4 结论

本文基于光岳楼木结构现场实测振动数据,采用 ITD 法计算得到了其自振频率,并与 STD 法和 OP. Polylscf 算法计算得到的光岳楼木结构自振频率进行了比较。从计算结果来看,采用 ITD 法和 STD 法计算得到的光岳楼木结构的第 1 阶频率比较接近,但与 OP. Polylscf 算法计算得到的光岳楼木结构的第 1 阶频率相比略偏小,考虑光岳楼木结构经过多次维修加固,增大了结构的整体刚度。而采用 ITD 法和 STD 法计算光岳楼木结构的其他各阶频率均大于采用 OP. Polylscf 算法的计算结果,除了第 3 阶频率的误差大于 10%外,其余各阶误差均小于 10%,说明采用 ITD 法计算木结构的自振频率具有较高的精度。

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.
- [2] 孟昭博,胡博森,赵庆双,等. 基于 STD 法的光岳楼木结构自振频率计算[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2015,28(4):37-41.
- [3] 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.
- [4] 杜飞平,谭永华,陈建华. 基于 ITD 和 STD 的液体火箭发动机模态参数辨识方法[J]. 火箭推进,2012,38(3):34-39.
- [5] 张艳辉. 基于风载激励下桥梁结构模态参数识别方法研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- [6] 狄生奎,张德强,李健. 基于 ITD 法的结构模态参数识别[J]. 土木工程与管理学报,2012,29(4):15-19.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 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.
- [8] 中华人民共和国国家标准. 城市区域环境振动标准(GB10070-88)[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
- [9] 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,2006.

- [10] 唐世振. 基于 MATLAB 的振动信号采集与分析系统的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [11] 胡博森. 光岳楼环道地面交通激励模拟及隔振措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [12] 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.

Modal Parameter Identification of Guangyue Tower's Wood Structure Based on the Method of ITD

PEI Ran-ran MENG Zhao-bo ZHANG Bao-liang ZHAO Qing-shuang

(School of Architecture and Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 250059, China)

Abstract The modal parameter identification of structure is the prerequisite and basis for the analysis of structural dynamic response. Natural vibration frequency is important modal parameters of its structural dynamic characteristics. Hence, the accurately calculation of structure natural frequency is very important for analyzing structural dynamic response based on numerical method and assessing safety of the structure. This paper obtained the natural frequency of Guangyue Tower's wood structure based on the measured vibration data and using the method of ITD, which were compared with the results obtained by the method of STD and OP. Polylyscf. The first order frequency of Guangyue Tower's wood structure is relatively close by the method of ITD and STD from the calculation results, but which is too small by the method of OP. Polylyscf. The reason for this result mainly is the overall stiffness increased of Guangyue Tower after multiple maintenance and reinforcement. The other frequencies of Guangyue Tower's wood structure by the method of ITD and STD are more than the calculation results of the method of OP. Polylyscf. The error of the rest of the order is within 10% but the third order frequency. This paper showed that the method of ITD has better precision to calculate the natural frequency of Guangyue Tower's wood structure compared to other methods.

Key words ITD method, Guangyue Tower's wood structure, modal parameter identification; natural frequency