

福建泉州古石塔结构动力特性测试与分析^{*}

蔡辉腾¹, 李 强²

(1. 福建省地震局, 福州 350003 2. 中国联合工程公司, 杭州 310022)

摘要: 采用中国地震局工程力学研究所研制的 SLJ100 型三分向力平衡加速度计, 进行泉州东、西塔结构脉动反应测试和模态分析, 可为同类古塔的测试和研究提供参考; 提出了砖石古塔自振周期的计算公式, 可为砖石古塔的抗震计算、鉴定及抗震加固提供一定的参考依据。

关键词: 古石塔; 动力特性测试; 模态分析; 自振周期

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)01-0051-05

0 引言

我国很多城市具有悠久的历史, 城市中保存有大量的具有历史文化特色或纪念意义的建(构)筑物, 对其进行抗震保护对城市的可持续发展具有重要意义。福建省泉州市作为我国的历史文化名城, 拥有一批世人瞩目的古建筑, 其中位于市区的古石塔东、西塔(图 1)是古泉州的重要标志。对泉州东、西塔的抗震性能进行勘查、测试并提出可行的鉴定方法, 是一项有益于传统文化保护和名城建设的研究。

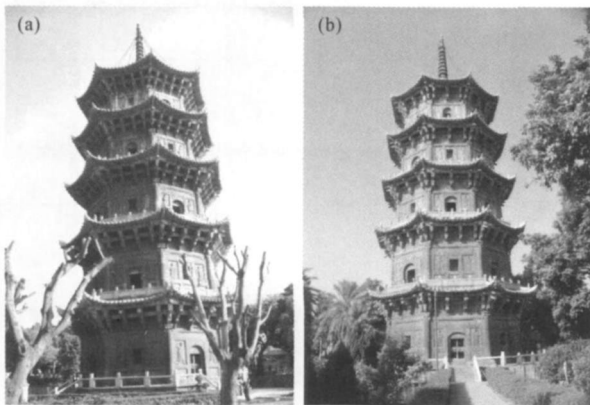


图 1 泉州古石塔东塔 (a) 和西塔 (b) 全景

结构的动力特性是分析古塔抗震性能的重要指标, 也可作为评价古塔残损状态的参照依据。结构的动力特性通常可通过建立理论力学模型或对结构进行现场实测获得。由于古石塔建造年代久远且存在损伤, 难以提供力学模型所需要的原

始数据和准确的参数, 因此, 现场实测是确定古塔动力特性的重要手段。

李德虎和何江(1990)曾对泉州古石塔的动力特性进行过测试。十几年过去, 由于受地震、风化、渗水以及寺庙常年香火烟熏对塔身的污染等因素的影响, 塔的材料性能及结构特性都有一定的改变。且随着拾振技术和信号处理技术的发展, 运用新型环境脉动仪测试古塔动力特性的试验和研究在不断深入, 测试效果也在不断提高。为了把握古石塔的现今实际结构动力特性, 为其抗震分析及建立动力学模型提供准确数据, 需重新对塔进行实测。

为此, 我们采用中国地震局工程力学研究所研制的 SLJ100 型三分向力平衡加速度计测取东、西塔在环境激振下的脉动反应, 结合功率谱和相位谱确定塔的固有频率, 并根据测点之间的互谱与自谱的比值获得塔的振型(李国强, 1995)。

1 工程概况

泉州东、西双塔相距约 200 m, 东塔称为镇国塔, 建于公元 865 年, 塔高 48.27 m; 西塔称为仁寿塔, 建于公元 917 年, 塔高 45.06 m。两塔结构相似, 都为仿木楼阁式的石结构建筑(图 1), 塔体由塔心柱(内筒)、塔筒(外筒)、连接梁、楼板等花岗岩料石构件叠砌而成, 其中塔心柱和塔筒分别为正八边形的实心 and 空心柱体(图 2)。塔筒每个外转角处均设立圆形石柱, 在石柱的梁托上及内、外筒的墙体上按等间隔设置仿木结构的

^{*} 收稿日期: 2008-01-21

石斗拱。在立面上塔体自下而上内、外筒半径逐层减小，形成内、外各 5 级阶梯，且每阶截面不变的阶形建筑。塔体每层每边设一门或一龛，门龛位置逐层、逐边互换。

2 动力特性测试方案

2.1 测试仪器

采用的观测仪器为 SLJ100 型三分向力平衡加

速度计，SL 系列加速度计将三轴各振动加速度真实转换成电压信号输出，以实现对各种低频、超低频振动的测量。它采用力平衡反馈新技术来弥补普通传感器的机械特性缺陷，克服了弹性部件的非线性失真及灵敏度阈值。该加速度计灵敏度高、线性范围大、动态响应好、低频从零赫兹开始，具有加速度平坦型频率特性响应，在记录系统中采用数字技术，可获得满意的精度和足够的动态范围。仪器参数见表 1。

表 1 SLJ100 型三分向力平衡加速度计参数

记录地动形式	量程	自振频率	噪声	灵敏度	电源	采样频率	阻尼比	频带	动态范围
三轴向加速度	$\pm 2\text{ g}$	80 Hz	$< 5\text{ }\mu\text{V}$	2.5 V/g	$\pm 12\text{ V}$	100 Hz	0.7	0~100 Hz	$> 120\text{ dB}$

2.2 拾振器的安装

拾振器一般安放在建筑物的刚度中心，根据石塔结构的实际情况以及现场试验的条件，我们将传感器定位在对称轴线上，传感器以胶结方式安装（图 2）。

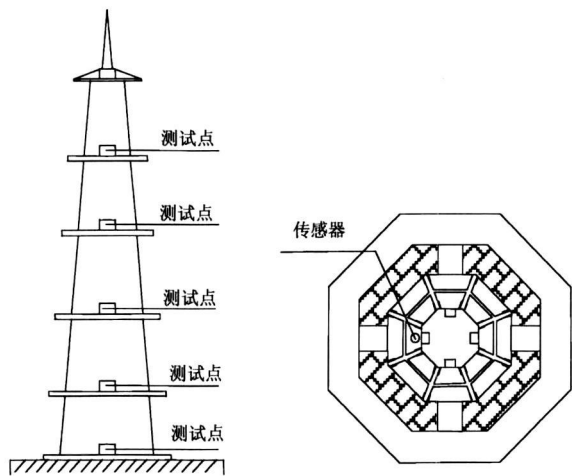


图 2 拾振器布置示意图

2.3 采样环境

采样最好选在夜深人静、外界干扰较小时，要有适当长的观测时间，特别是第二、三阶自振频率的观测时间需更长。为获得理想的测试数据，东、西两塔的测试时间从晚上 11 点到早上 9 点，每次采样 30 分钟。

2.4 测试结果

每一测组可以得到相应五层的加速度时程。对初始测试数据进行灵敏度及放大倍数的调整，就可得相应的加速度时程。图 3 为东塔第一测组的一个加速度时程样本。

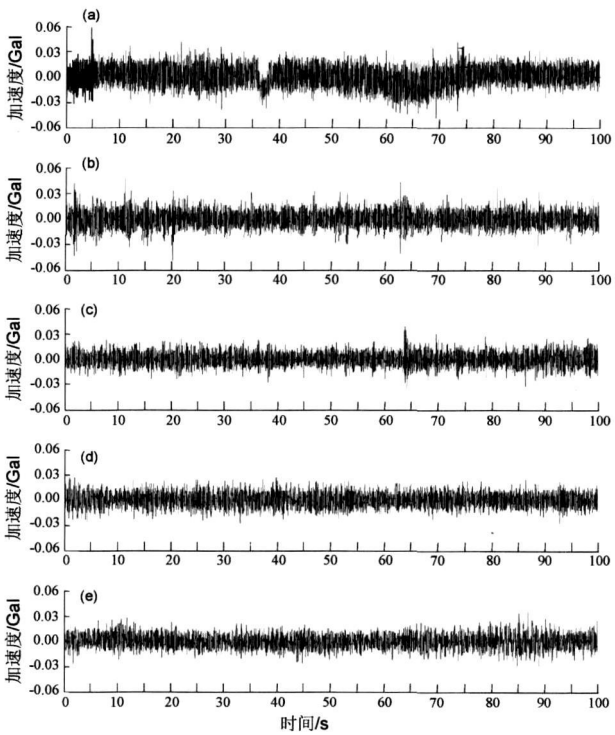


图 3 东塔第一测组的加速度时程

(a) 一层；(b) 二层；(c) 三层；
(d) 四层；(e) 五层

3 模态识别结果

3.1 识别原理

笔者基于工程振动反演理论（李国强，1995），通过提取振型、模态频率等线性模态参数，来测定古石塔结构的动力特性。

但由于试验对象处于闹市区，不可避免存在测量噪声和激励谱的影响，故结构反应自功率谱

的峰值处对应的不一定是模态频率。笔者依据李国强（1995）提出的原则，由结构反应频谱特征判别结构模态频率：

- （1）结构反应各测点的自功率谱峰值位于同一频率处；
- （2）模态频率处各测点间的相干函数较大；
- （3）各测点在模态频率处具有同相位或反相位。

3.2 识别结果

笔者根据上述方法和原则，基于 MATLAB 平台自编程序，通过识别得出结构的前三阶频率、振型阻尼比和前三阶振型。图 4 给出了分析所得的东塔第一测组的自功率谱和互功率谱。由图可以得出结构的前两阶频率，识别结果如表 2 所示。前三阶振型如图 5 所示，采用半功率法（王光远，2006）计算得到的结构的前三阶振型阻尼比见表 2。

表 2 频率和阻尼比识别结果

参数	东塔			西塔		
	1阶	2阶	3阶	1阶	2阶	3阶
频率 /Hz	1.19	3.66	9.9	1.42	4.03	10.3
阻尼比 (%)	2.14	1.73	0.6	2.13	1.00	0.69

4 结果分析和讨论

4.1 结果对比

李德虎和何江（1990）、林建生（1990）都曾对泉州古塔的动力特性进行过研究，表 3 给出了他们的研究结果和本文的结果。

表 3 东、西塔的第一自振周期（单位：s）

对比项目	东塔	西塔	备注
本文结果	0.84	0.70	实测
李德虎的结果	0.85	0.80	实测
林建生的结果	—	0.47	计算

由表 3 可见：

（1）计算的结果和试验结果相差较大。说明因为缺乏详细的古建筑资料，古塔的材料性能、结构特征难以掌握，给古建筑的动力分析带来了一定困难，以至于计算结果和试验结果相差较大。这也从侧面反映进行古建筑动力特性试验的必要性。

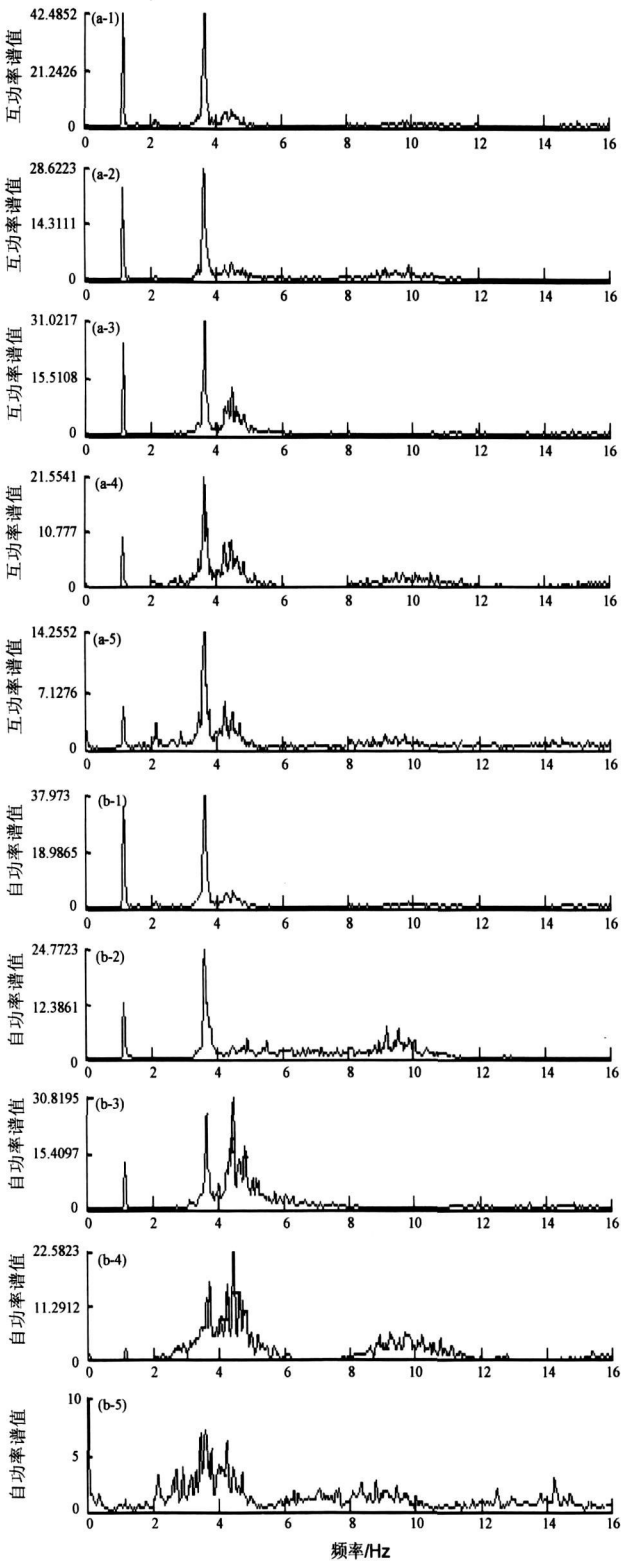


图 4 东塔第一测组互功率谱 (a) 和自功率谱 (b)

- (a1) 五层, $f=3.66\text{ Hz}$ (a2) 四层, $f=3.65\text{ Hz}$
- (a3) 三层, $f=3.66\text{ Hz}$ (a4) 二层, $f=3.65\text{ Hz}$
- (a5) 一层, $f=3.65\text{ Hz}$ (b1) 五层, $f=3.65\text{ Hz}$
- (b2) 四层, $f=3.63\text{ Hz}$ (b3) 三层, $f=4.49\text{ Hz}$
- (b4) 二层, $f=4.48\text{ Hz}$ (b5) 一层, $f=3.60\text{ Hz}$

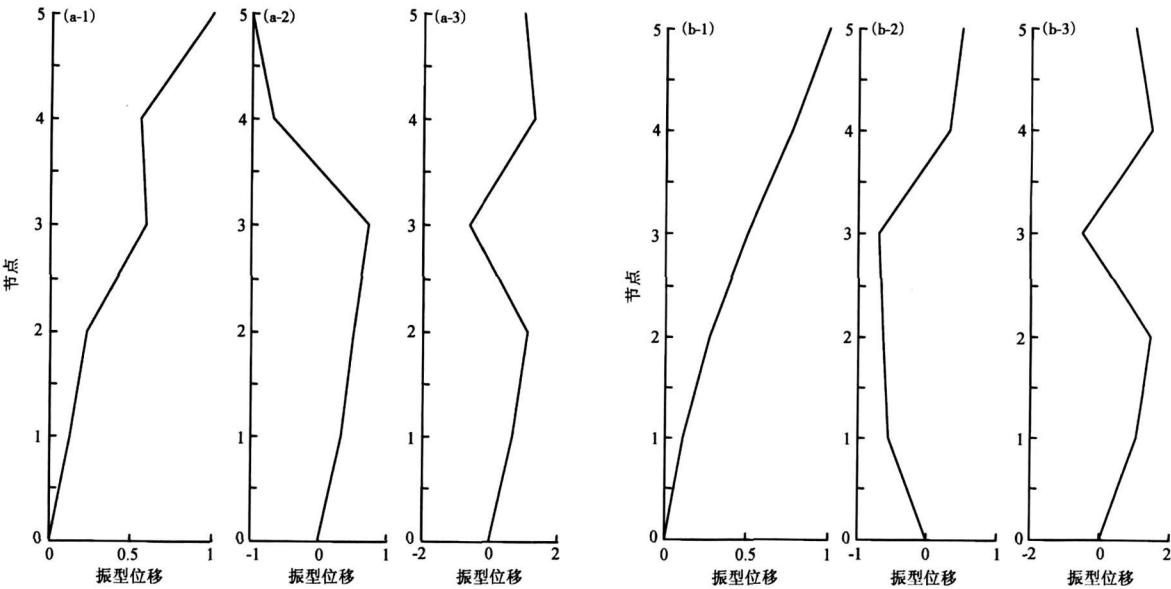


图 5 东塔 (a) 和西塔 (b) 振型图
(a₁) 1阶; (a₂) 2阶; (a₃) 3阶; (b₁) 1阶; (b₂) 2阶; (b₃) 3阶;

(2) 本文结果与李德虎和何江 (1990) 的结果相比较, 东塔相差不大, 西塔相差较大。这可能与试验测试方向、塔破坏情况以及测试技术不同有关。虽然东、西塔均为轴对称建筑, 但东塔保存较好, 各个方向自振周期相差不大, 西塔破坏较严重, 各个方向自振周期相差较大。这说明, 对破坏较严重的古建筑, 如果要全方位了解其动力特性, 测试方向应在其所有通过刚度中心的对称轴线满布。经过 18 年时间, 塔的材料性能及结构特性都有一定的改变, 这可能也是导致本文结果与李德虎和何江 (1990) 的结果有所差别的原因之一。

4.2 估算砖石古塔自振周期

为了给砖石古塔抗震性能分析提供简便的第

一自振周期估算方法, 笔者对已有的实测结果进行分析归纳 (表 4), 得到砖石古塔第一自振周期的经验公式:

$$T=0.279\ 1+0.003\ 1\eta H^2/D\tag{1}$$

$$T=-0.531\ 3+0.069\eta H\sqrt[3]{D}.\tag{2}$$

式中, η 为砌体弹性模量影响系数, 古砖塔取 1.0 古石塔取 1.1; H 为塔体计算高度, 从塔基算至塔顶; D 为塔底面尺度, 对于多边形取两对边距离, 对于圆形取直径。

李德虎和何江 (1990) 给出的结果是

$$T=0.004\ 2\eta_1\eta_2 H^2/D;\tag{3}$$

表 4 第一自振周期实测值与估算

塔名	类型	D/m	H/m	T/s	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	$(T_1-T)/T$	$(T_2-T)/T$	$(T_3-T)/T$	$(T_4-T)/T$
小雁塔	砖	11.0	40.8	0.72	0.75	0.73	0.70	0.84	3.92%	2.02%	16.02%	-2.90%
大雁塔	砖	25.0	60.3	0.66	0.73	0.89	0.67	0.74	10.60%	35.10%	11.66%	1.81%
千寻塔	砖	9.9	67.7	2.00	1.71	1.64	2.14	1.71	-14.29%	-17.79%	-14.61%	6.94%
镇国塔	石	14.0	48.2	0.84	0.84	0.99	0.84	0.88	0.59%	17.45%	4.32%	0.40%
仁寿塔	石	13.3	44.1	0.70	0.78	0.88	0.74	0.82	11.10%	25.92%	17.29%	6.16%
法王塔	砖	8.4	27.8	0.59	0.56	0.41	0.43	0.67	-4.35%	-30.11%	13.43%	-27.96%
六胜塔	石	14.5	32.9	0.58	0.53	0.49	0.38	0.56	-7.99%	-15.05%	-3.70%	-34.59%
光塔	砖	8.5	34.2	0.80	0.71	0.62	0.64	0.80	-11.79%	-21.88%	-0.39%	-20.53%
虎丘塔	砖	11.04	47.7	0.83	0.92	0.95	0.95	0.99	10.60%	14.08%	19.12%	14.72%
福寺塔	砖	9.0	67.6	1.607	1.85	1.71	2.34	1.83	15.26%	6.44%	14.03%	45.89%

注: 镇国塔、仁寿塔分别为本研究中东、西塔的别名; 小雁塔、大雁塔、千寻塔数据来源于李德虎和何江 (1990); 法王塔数据来源于文立华等 (1995); 六胜塔数据来源于郭小东等 (2005); 光塔数据来源于沈朝勇等 (2005); 虎丘塔数据来源于袁建力等 (2005); 福寺塔数据来源于魏俊亚和张东平 (2007); T 为实测值; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别是根据本文式 (1)、式 (2)、式 (3)、式 (4) 计算的结果。

魏俊亚和张东平 (2007) 的结果是

$$T = \alpha \beta (0.4116 + 0.0028 H^2 / D) \quad (4)$$

式中, η_1 为砌体弹性模量影响系数, 对于古砖塔取 1.0 对于古石塔取 1.1; η_2 为塔体开孔影响系数, 无孔取 1.0 有孔取 1.1; α 为塔体高宽比的影响系数, $H/D \leq 3$ 时 $\alpha = 0.9$ $H/D > 3$ 时 $\alpha = 1.0$ β 为塔体结构形式的影响系数, 塔体为单筒式结构时 $\beta = 1.0$ 塔体为双筒式结构时 $\beta = 1.4$ 。其余参数与 (1)、(2) 式相同。

利用上文得到的计算公式对部分砖石古塔的第一自振周期进行计算, 并与实测值进行对比, 其结果列于表 4。由表 4 可以看出, 估算公式 (1) 的计算结果与砖石古塔实际第一自振周期符合良好, 误差在 15.26% 以下, 因此, 本文中提出的估算公式 (1) 可以用来计算现存砖石古塔的第一自振周期。目前, 现有砖石古塔第一自振周期实测资料还不够充分, 估算公式的概括性与精度还有待有更多的数据去检验和更新。

5 结语

笔者采用中国地震局工程力学研究所研制的 SLJ100 型三分向力平衡加速度计测试了泉州东、西塔在环境激振 (风和 (或) 地脉动) 下的结构脉动反应, 并进行了模态分析。结果表明: 按本

测试方案获得的试验结果较为理想, 可为同类古塔的测试和研究提供参考。

根据本文给出的估算砖石古塔第一自振周期的公式计算得到的结果和实测值吻合较好, 在对古塔进行抗震鉴定和抗震加固中, 可以用该公式来估算一些无实测数据的砖石古塔的第一自振周期。

福建省地震局福建地震灾害预防中心黄昭主任、王善雄、张隆副主任为本研究提供了资料及帮助, 韦永祥等人参与了现场测试, 在此一并致谢。

参考文献:

- 郭小东, 马东辉, 苏经宇. 2005. 结合脉动测试的砖石古塔震害预测方法 [J]. 工程抗震与加固改造, 27 (4): 79—83.
- 李德虎, 何江. 1990. 砖石古塔动力特性的试验研究 [J]. 工程抗震, 3 (9): 34—36.
- 李国强. 1995. 结构模态参数识别方法 (I): 频域法 [R]. 上海: 同济大学.
- 林建生. 1990. 泉州古石塔的抗震分析 [J]. 工程抗震, 3 (9): 37—42.
- 沈朝勇, 黄襄云, 陈建秋, 等. 2005. 一古代砖塔的测试与抗震性能研究 [J]. 国外建材科技, 26 (1): 103—104.
- 王光远. 2006. 结构动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社.
- 魏俊亚, 张东平. 2007. 砖石古塔动力特性初探 [J]. 山西建筑, 33 (20): 56—57.
- 文力华, 王尚文, 刘洪兵. 1995. 古塔动力性能试验 [J]. 工程抗震 (4): 30—31.
- 袁建力, 樊华, 陈汉斌, 等. 2005. 虎丘塔动力特性的试验研究 [J]. 工程力学, 22 (5): 158—163.

Measurement and Analysis for Structural Dynamic Properties of Ancient Masonry Pagodas in Quanzhou, Fujian

CAI Huï teng, LI Qiang

(1. Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

(2. China United Engineering Co., Hangzhou 310022, Zhejiang, China)

Abstract

We carry out the structural pulsating reaction test and the modal analysis for East Tower and West Tower in Quanzhou of Fujian using Type SLJ100 three component dynamic balance accelerometer developed by Engineering Mechanics Institute, CEA. This work will provide reference for the measurement and investigation of similar ancient pagodas. We also present the formula for calculating natural vibration period of ancient masonry pagodas. It could be used in earthquake-proof calculation, identification and reinforcement of ancient pagodas.

Key words: ancient masonry pagoda; measurement of dynamic property; modal analysis; natural vibration period