

永乐大钟-悬挂结构动态响应分析

程载斌 申仲翰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文针对永乐大钟-悬挂结构在撞钟激励下的动态响应进行了振动测试分析。在钟锤前端布置传感器测量锤头的加速度, 估算钟锤的激励力; 在钟架悬挂结构顶端悬挂点布置传感器测量悬挂木架主梁的加速度响应。通过时域与频域分析, 给出了大钟-悬挂结构的自振特性和撞钟激励下的动态响应, 从而为永乐大钟的保护和撞钟安全评估提供参考。

关键词: 永乐大钟, 动态响应, 安全评估

1 前言

永乐大钟是安置于北京三环外大钟寺古钟博物馆内的一座著名古钟, 明成祖永乐年间铸造, 迄今有近六百年历史, 被称为世之瑰宝、国之重器。它高6.75m, 重46.5t, 最大直径3.3m, 悬挂于梁柱组合的木质框架结构, 钟体上下遍布了23万字的佛经铭文。在历经了580多年风风雨雨之后, 大钟依然保存完好, 没有任何锈蚀^[1-3]。由于年代久远, 悬挂结构的木质框架已经老化, 个别大梁出现严重糟腐孔洞, 虽然经历地震波的严酷考验而不倒, 但从文物保护的角度及安全的需要, 仍需对大钟-悬挂整体结构进行安全评估。

撞钟时, 永乐大钟的钟声雄浑有力, 延绵不绝, 仅余音就可持续3分钟之久, 远在四五公里之外都清晰可辨。用这样一口大钟的钟声作为新年的祝福, 最能表达人们的心愿。每逢过年过节, 人们都纷纷到大钟寺敲钟来表达祝福, 钟锤的撞击成为永乐大钟的常激励源, 从而影响悬挂结构的安全。因此, 撞钟条件下, 钟-架悬挂结构体系的动态响应测试成为安全评估工作的重要组成部分。受大钟寺文物保护主管部门委托, 我们对钟-架悬挂体系在撞钟激励条件下的动态响应作了测试和分析。

2 动态测试

动态测试内容主要由两部分组成: (1) 撞钟时钟锤与钟体接触瞬间的锤头加速度和撞击力, 即激励源; (2) 钟架主体上大钟悬挂点的加速度响应。为实现这一目的, 我们分别在钟锤前端及主梁悬挂点附近安放了加速度传感器, 在撞击状态下, 对上述两测点的振动响应作了同步测量。

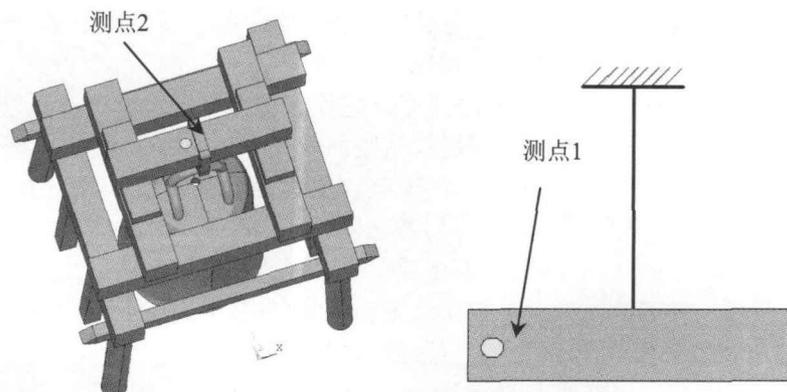
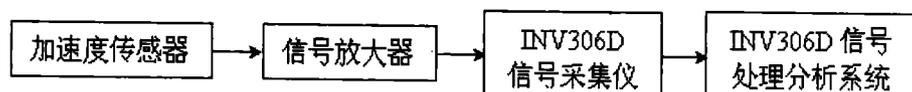


图1 钟-架体系及传感器布置示意图

主要测量设备框图如下：



3 测试结果及分析

3.1 锤头加速度和撞击力

钟锤用悬索吊挂，敲击时，撞钟人手持悬索将钟锤摆动，临近撞击点时钟锤达到一定速度，在接触瞬间动量迅速衰减，产生衰减的加速度，亦即撞钟加速度脉冲。图2所示为撞钟加速度脉冲曲线图，其脉冲峰值为 207m/s^2 ，脉冲宽度为 $16\sim 18\text{ms}$ 。

钟锤质量为 $m=50\text{kg}$ ，由 $F=ma$ ，可将加速度脉冲转化为力脉冲，力脉冲峰值为 10350N 。将上述加速度脉冲信号进行谱分析可得脉冲频谱图，如图3所示，由图中曲线可知，撞击脉冲主频为 7.5Hz ，这是撞击力的主峰能频率，造成如此偏低的主频是由于木质锤头包有泡沫缓冲垫所致。

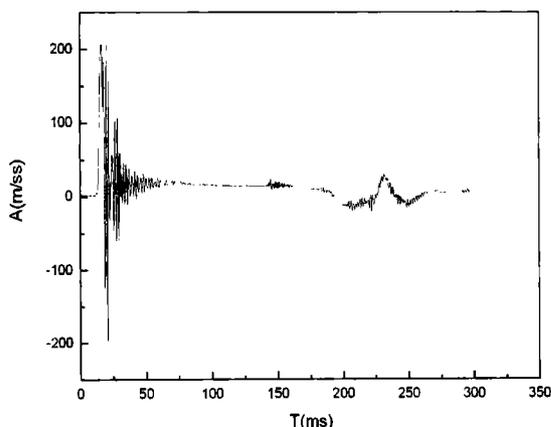


图2 撞钟加速度脉冲曲线

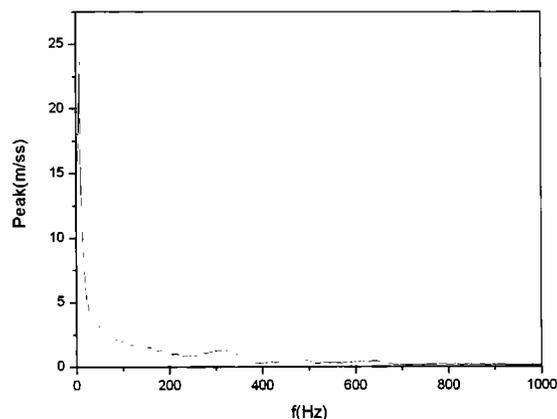


图3 撞钟力脉冲频谱图

3.2 主梁悬挂点动态响应

除钟锤之外，我们还对主梁的振动作了同步测量。图4所示为时域振动曲线，表现出自由衰减的特征，以曲线前端（首段）部分为对象估计其均方加速度为 0.04m/s^2 ，由图5所示主梁振动响应频谱图可看出主峰能频率约为 90Hz 。

如再从图4所示主梁振动时程曲线的尾段部分进行分析，可近似得出其是以 2.5Hz 为主， 90Hz 为辅的叠加振动波形，为更清晰，我们取尾段曲线光滑放大后示于图6。研究分析图4和图6可获得如下振动现象：当钟架被撞击后的瞬间，梁的振动是以高频（ 90Hz ）振动为主，当然也隐含了 $2.5\sim 3\text{Hz}$ 的成分，二者相比，后者比例甚小。但随着时间推移，振动衰减，高频（ 90Hz ）衰减很快，低频（ $2.5\sim 3\text{Hz}$ ）则衰减较慢，因此到了尾部时， $2.5\sim 3\text{Hz}$ 的能量超过了 90Hz 的能量。按照一般结构振动衰减规律，振动系统自由衰减过程中最后残留的成分应是基频，由此可以判断 $2.5\sim 3\text{Hz}$ 的频率为钟一架组合结构的基频。又从质量分布分析， 46.5t 的大钟集中悬挂在框架顶部，占框架大部分质量的梁结构也在顶部，因此钟一架结构近似于一

个单自由系统，这个单自由系统的固有频率即为2.5~3Hz左右。

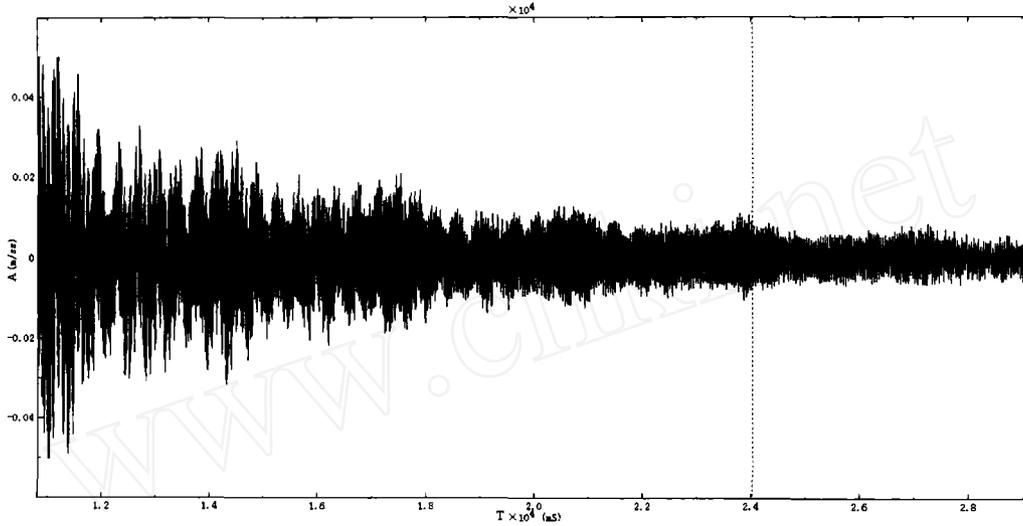


图4 主梁振动时程曲线

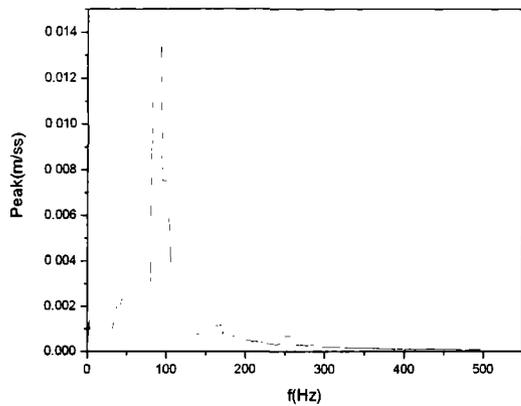


图5 主梁振动频谱图

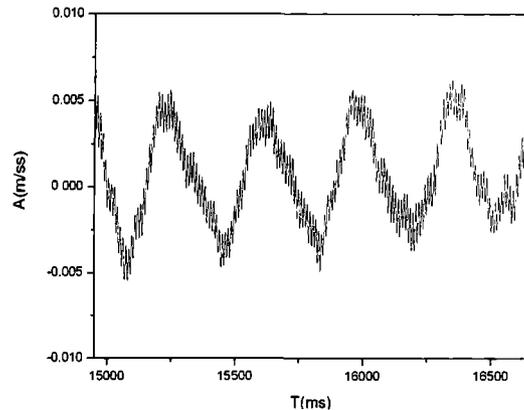


图6 主梁振动时程曲线（尾段）

有了上述分析就不难看出，图4中主梁振动时程曲线首段和尾段频率成分变化的原因，由于钟锤撞击脉冲力成分为7.5Hz，约为钟—架组合结构的主频2.5Hz的3倍，其激励点又在大钟下端（不在重心），因此难于激起主频（2.5Hz）的振动，而90Hz的成分则很容易被激起，这就形成了主梁振动响应的频率分布状态。而与系统基频相去甚远的90Hz高频振动应是主梁的局部（安放传感器的表层结构）振动频率。

通过上述分析可知，我们所测到的加速度为 0.04m/s^2 的振动不是大梁的主振动，在 0.04m/s^2 的振动中的大部分能量是主梁的局部振动，真正的主梁振动的加速度将远远小于 0.04m/s^2 ，最高不超过 0.01m/s^2 。

4 主要结论

由测试及结果分析可得如下结论：

- (1) 敲钟时，钟锤与钟体接触的瞬间产生的加速度脉冲强度为 207m/s^2 ，脉冲宽度为

16~18ms;

(2) 以钟锤质量为50Kg计钟锤对钟体作用的力脉冲强度为10350N, 力脉冲宽度为16~18ms;

(3) 钟一架组合结构体系在敲击方向的一阶固有频率约为2.5~3Hz。该系统还可近似看作是以木梁和钟体总质量与框架弯曲刚度构成的单自由系统;

(4) 敲钟时, 悬挂钟体的主梁加速度均方值小于 0.01m/s^2 , 若按钟体质量为46.5t计算, 此时主梁所受的水平撞击力约在500N以内, 与静态重力载荷相比应是千分之一的小量。

从测试分析结果来看, 在保证大钟承重的条件下, 近期撞钟不会对永乐大钟一悬挂结构的安全构成威胁。当然, 要全面地保护永乐大钟, 还应作较为全面的测试分析, 如木质框架结构的损伤检测、强度分析, 定期的动态测试, 合理的维修加固等, 这些都有待于进一步的工作。

参考文献

1. 马法柱, 全锦云等. 古刹梵钟. 大钟寺古钟博物馆编 (中英文合订本). 北京: 中国农业科技出版社, 1998
2. 陈通, 郑大瑞. 永乐大钟的声学特性. 大钟寺古钟博物馆建馆二十周年纪念文集. 大钟寺古钟博物馆编, 北京: 北京出版社—天津出版社, 2001. 184~190
3. 夏明明, 冯长根等. 永乐大钟悬挂结构力学问题初探. 文物, 1990, 7: 71~73

Abstract: In the present paper, vibration testing and analysis of Yongle bell-suspension structure under beater impact was carried out. Acceleration response was measured by placing sensor on beater head and acceleration response of main beam on suspension point was also measured. The impact force was also estimated. Free vibration characteristics and dynamic response under beater impact were obtained by time and frequency domain analysis. It could provide references for protection and security evaluation under beater impact of Yongle bell.

Key words: Yongle bell, dynamic response, security evaluation