

大跨度高空钢结构连廊的有限元模型修正^{*}

郑毅敏¹, 孙华华¹, 赵昕¹, 陈伟², 章荣海², 沈旭东²

(1. 同济大学建筑设计研究院, 上海 200092; 2. 杭州市民中心工程建设指挥部, 浙江 杭州 310000)

摘要: 使用基于灵敏度分析和贝叶斯估计的有限元模型修正方法对复杂连体高层建筑群杭州市民中心的高空钢结构连廊进行了有限元模型修正。通过频率误差和模态置信因子计算, 比较分析了修正前连廊数值模型的模态参数和基于环境激励下实测得到的连廊模态参数, 以确定数值模型动力特性与实际结构动力特性的差异。通过模态参数对连廊构件物理参数的敏感度分析构造灵敏度矩阵, 并在此基础上筛选出对结构模态参数影响程度大的参数。基于贝叶斯估计法构造参数加权矩阵和响应加权矩阵, 根据待修正参数初始设计值的置信度设置参数允许的上下边界值, 按一定的收敛准则进行迭代修正。修正后连廊模型的动力特性与实测动力特性有很好的一致性, 修正模型可以用来对连廊进行振动控制、响应预测及性态评估。

关键词: 灵敏度分析; 有限元模型修正; 连体高层建筑; 高空钢结构连廊; 贝叶斯估计

中图分类号:TU 973⁺.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4523(2009)01-0105-06

引言

随着结构足尺试验、数字信号处理及计算机辅助等技术的发展, 通过动力试验可以较精确地获得结构的动力特性参数(频率、振型及相应的阻尼比)。可以认为由动力试验获得的结构动力特性比有限元分析得到的理论动力特性更加可靠^[1]。研究者开始更多地关注有限元模型分析结果与现场实测结果之间的相关性, 通过相关性分析, 定性和定量地确定理论模态参数与实测模态参数之间的相似和差异。以实测模态参数为依据, 对初始有限元模型进行修正可以获得能准确反映真实结构低阶模态特性并可靠预测高阶模态特性的结构模型, 从而为确定地震作用、分析风振响应和了解结构的振动正常使用状态性能等提供了重要基础。

国内外研究者已对多项大型复杂土木工程设施进行了动力检测并在此基础上修正有限元模型, 相关的工程实例有:南京电视塔的模型修正^[2], 深圳市民中心屋顶网架结构的模型修正^[3], 基于环境振动测试的润扬长江大桥的模型修正^[4], 48层高层建筑的模型修正以及人行天桥的模型修正等^[5,6]。除此之外, Brownjohn 还采用模型修正方法对一悬索桥进行性态评估和损伤识别^[7]。

常规方法在处理大型结构模型修正时主要存在

如下缺点:基于整体质量、刚度矩阵, 无法反映构件参数的变化情况;基于较为抽象的数学表达, 修正结果缺乏明确的物理意义。与常规方法相比, 基于贝叶斯估计的模型修正方法不是对模型的刚度矩阵、质量矩阵修正, 而是通过修改结构构件设计参数(如 A , E , ρ 等)来实现修正目的。该修正方法的修正过程更加直观, 修正参数也更加具体化, 修正后的结果也易于解释, 有明确的物理意义。

本文主要目的是对复杂连体高层建筑群杭州市民中心的关键子结构——高空钢结构连廊进行有限元模型修正。首先介绍了基于灵敏度分析和贝叶斯估计的有限元模型修正技术;其次描述了杭州市民中心工程概况, 分别进行了初始有限元模型模态分析和环境激励下实测模态参数识别, 并加以比较以确定数值模型动力特性与实际结构动力特性的差异;最后以实测模态参数为依据, 对高空连廊进行了模型修正。修正后的结构模型可以更好地反映已建高空钢结构连廊的真实动力特性, 为准确地预测结构的动力响应, 衡量真实结构的可靠度提供了重要基础。

1 基于灵敏度分析的模型修正技术

对结构进行模型修正可看作是以实测模态参数为目标函数, 以模型设计参数为修正变量的结构优化过程。通过模态参数对结构设计参数的一阶泰勒

展开并略去高阶项^[1,8], 得到

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \\ \Phi \end{bmatrix} + S \{ \mathbf{P}_u - \mathbf{P}_0 \}$$

或 $\Delta \mathbf{R} = S \Delta \mathbf{P}$ (1)

式中 $\Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \lambda \\ \Phi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda \\ \Phi \end{bmatrix}$ 为实测模态参数与理论模态参数的误差向量, $\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}_u - \mathbf{P}_0$ 为设计参数修正值向量, \mathbf{P}_u 为修正后的设计参数向量, \mathbf{P}_0 为修正前的设计参数向量; S 为灵敏度矩阵, Fox, Kapoor 于 1968 年推导出特征值和特征向量对参数变化的关系^[9], $S_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial P_j}$ 表示模态参数 R_i 对第 j 个设计参数 P_j 的一阶偏导值。

本文采用贝叶斯估计法求解式(1)。贝叶斯估计法同时引入了 \mathbf{W}_R , \mathbf{W}_P 两种矩阵, 两种加权矩阵的引入可以克服因敏感度矩阵 S 病态而导致方程组病态的问题^[10]。 \mathbf{W}_R 和 \mathbf{W}_P 反映了分析者的工程经验和工程判断, 对于可靠性较高的模态参数或设计参数可以赋以较大的加权系数, 反之亦然。较大的加权系数的模态参数将对修正结果有较大的影响。而有较大加权系数的设计参数将具有较小的修正量。

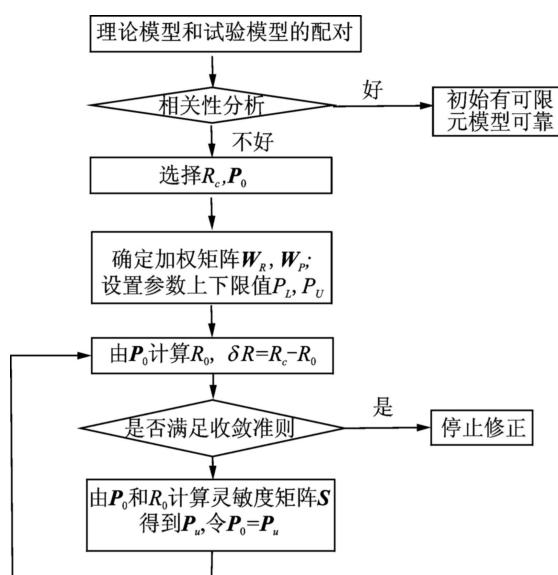
$\Delta \mathbf{P}$ 估算可以通过下述方程的极小来获得

$$\min J(\Delta \mathbf{P}) = (\Delta \mathbf{R} - S \Delta \mathbf{P})^T \mathbf{W}_R (\Delta \mathbf{R} - S \Delta \mathbf{P}) + \Delta \mathbf{P}^T \mathbf{W}_P \Delta \mathbf{P} \quad (2)$$

当待修正参数数目大于测量模态参数数目时, 上式的解为

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{W}_P^{-1} S^T (\mathbf{W}_R^{-1} + S \mathbf{W}_P^{-1} S^T)^{-1} \Delta \mathbf{R} \quad (3)$$

基于灵敏度分析和贝叶斯估计的模型修正主要有以下几个步骤(参见图 1):



(1) 模型修正工作始于理论模型和试验模型的配对, 包括测点坐标的匹配、振型的匹配等。

(2) 相关性分析。采用模态置信因子 MAC (Modal Assurance Criterion) 来衡量不同振型向量相关性; 其次是频率误差分析, 采用计算频率和实测频率的相对误差进行衡量。

(3) 选择目标函数 R_e 和待修正参数 P_0 。目标函数一般为结构的动力特性如频率、振型或者两者结合。设计参数选择时, 应根据实际建模情况选择具有不确定性且对目标函数比较敏感的参数。

(4) 确定模态参数加权矩阵 \mathbf{W}_R 和设计参数加权矩阵 \mathbf{W}_P , 引入待修正参数的上、下限值, 使修正的参数在具有实际物理意义的范围内。

(5) 由 \mathbf{P}_0 与其对应的计算模态参数 \mathbf{R}_0 计算敏感度矩阵 \mathbf{S} , 并通过公式(1)得到修正后的参数。

2 大跨度高空连廊结构的数值分析及动力测试

2.1 工程背景

杭州市市民中心位于杭州市钱江新城中央商务区, 主体工程为环形排列的 6 幢高度约 100 m 的钢筋混凝土弧形塔楼。各塔楼之间的 23 和 24 层(离地标高约 90 m)处设有 6 座两层高的环形钢结构连廊, 连廊通过隔震支座与两侧塔楼连成整体(图 2)。



图 2 杭州市市民中心示意图

2.2 连廊结构的数值建模和分析

所建立的三维有限元模型采用了 4 种不同的单元。空间梁单元模拟桁架中的主要水平和竖向构件, 杆单元模拟桁架中的钢管立柱, 质点单元模拟附加的结构质量, 三维壳单元模拟底层压型钢板。根据设计要求, 模型材料主要采用 Q345B, 其弹性模量取为 2.06E5 MPa, 泊松比为 0.3。质量密度取 7 850 kg/m³。网格划分后的有限元模型共有节点 4 853 个, 单元 6 545 个, 初始有限元模型见图 3。基于子空间迭代方法对模型进行了模态分析, 获得的前 5 阶

模态的频率结果见表1。前3阶竖向弯曲振型如图4~6。

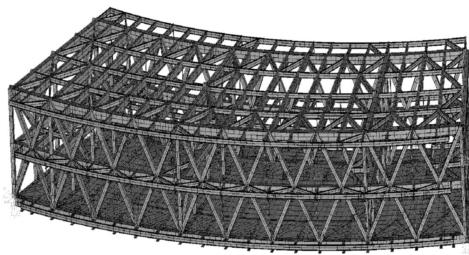


图3 连廊三维有限元模型

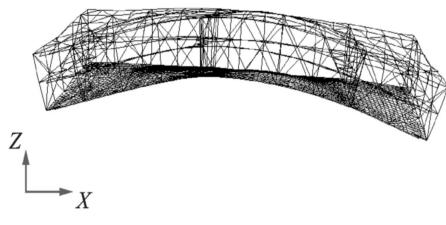


图4 连廊1阶弯曲振型

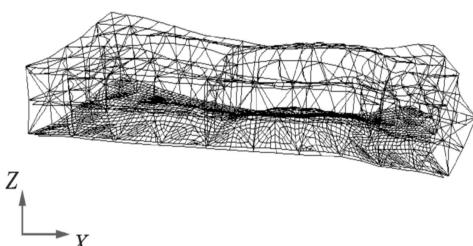


图5 连廊2阶弯曲振型

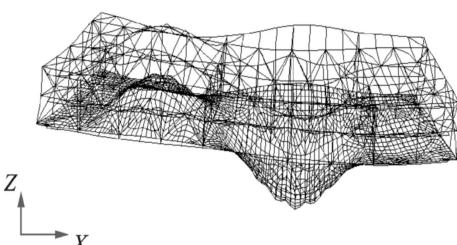


图6 连廊3阶弯曲振型

为获得连廊在环境激励下(地脉动和风荷载)的动力特性参数,对正对台风方向、跨度最大的R1连廊进行了现场动力检测。主要测试仪器是6个内装IC压电式加速度传感器,16通道的UA302A/UA302HA型A/D采集器一台,导线若干及笔记本电脑相关设备。传感器直接安放在连廊底层的主梁上,通过初始有限元分析确定传感器布设位置,传感器布置如图7。通过传感器拾得加速度信号,并进行预处理,采用频域识别的峰值法对数据进行动力参数识别。频率通过平均正则化功率谱密度曲线上的峰值确定^[11],振型通过自功率谱和互功率谱的峰值及相位的相对关系确定。根据峰值法原理编制了模态参数识别的Matlab程序^[12],所识别的连廊前几阶频率见表1。

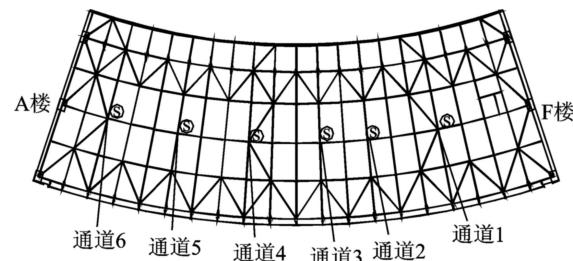


图7 传感器布置图

表1 初始计算模态参数与实测模态参数比较

实测识别阶数	实测频率 f_e/Hz	理论分析阶数	修正前计算频率 f_a/Hz	频率相对误差/%	振型相关性MAC	振型描述
1	3.56	1	3.49	1.97	0.99	1阶弯曲
2	4.81	2	5.21	8.32	0.96	2阶弯曲
3	6.25	3	6.60	5.60	0.91	1阶扭转
4	7.29	4	8.44	15.8	0.85	2阶扭转
5	9.81	6	10.66	8.66	0.97	3阶弯曲

对2.2节中理论分析结果及3.3节中实测识别结果进行比较分析,主要包括频率误差比较和振型相关性分析,比较结果见表1。从表1中可以看出连廊的第1阶计算频率与识别频率的误差最小,随着阶数的增大,误差变大。实测的1阶、2阶及3阶弯曲振型分别与计算获得的1阶、2阶及6阶振型对应;实测的1阶扭转、2阶扭转振型分别与计算获得的3阶、4阶振型对应,模态置因子MAC的数值都比较高,这说明了计算振型与识别振型有很好的相关性。综合分析来看,连廊计算振型与识别振型可以很好地匹配,但各阶频率的误差较大。为获得较精确的数值模型,采用基于灵敏度分析和贝叶斯估计的方法,根据前面的修正步骤对连廊三维数值模型进行了修正。

2.3 环境激励下的动力测试

中国知网 <https://www.cnki.net>

连廊的动力特性参数主要有频率、振型和阻尼。

3 连廊模型修正

3.1 确定目标函数和加权矩阵 W_R

根据第2节的分析可以确定,连廊有限元模型与实际模型的动力特性参数误差主要来自于计算频率和识别频率的误差,因此修正时选择实测前5阶频率作目标函数。考虑到振型的相关性较好未直接将振型作为目标函数,而是利用MAC来验证数值模型的修正精度,即:仅以频率作为目标进行修正,修正后的MAC较修正前的MAC值若提高则说明修正精度高,反之亦然。受阻尼和外界噪音的影响,实测频率的精度随阶数递减,取各阶频率的加权系数为 $W_R = \text{diag}\{100, 50, 10, 10, 10\}$ 。

3.2 选择待修正参数和加权矩阵 W_P

考虑到连廊各构件和支座均为预制,可以认为各构件截面尺寸和边界条件是能精确模拟的,故无需进行修正。模型中连廊两端4个支座均采用铰接连接。实际高空连廊两端的支承边界最大的特点是其支承于两侧的高层建筑之上。本文所采用的模型修正算法是基于连廊的模态参数的。低阶高层建筑的振型均为水平向振型,其竖向振型均为高阶振型。而连廊结构的主要低阶振型均为竖向振型,用于模型修正的连廊主要竖向振型与其支承的高层建筑水平振型之间几乎不存在耦合作用。因此,高空连廊的支承边界不会对其模型修正产生显著影响,在选择修正参数时亦没有考虑边界条件。考虑到杭州市民中心为新建工程,本文假定试验时结构尚未产生损伤,因此文中并没有从结构自身的损伤状况角度来选择修正杆件。

由于连廊构件数量之多及施工不确定性,无法获取准确的构件弹性模量;连廊底层工字型杆件上均涂有防火及隔音材料也引起了底层构件质量密度的不确定性。故设计参数中不确定的因素主要有主受力杆件、一般杆件的弹性模量和底层杆件的质量密度。选择主受力杆件弹性模量(图8)和一般杆件弹性模量和连廊底层杆件质量密度作敏感度分析(图9),图9清楚地显示了影响连廊各阶频率的敏感参数。由于底层杆件质量密度初始估计值可信度不高,该类参数权重系数取5,其它类参数权重系数取10。文献[11]指出当有参数对实测频率影响非常小或参数的组合对频率影响相近,常常会造成敏感度矩阵S出现病态。因此从图9中剔除对结构频率敏感性

不高的杆件,最终确定的待修正参数、初始估计值见表2。

合理地选取修正参数的上下限取值非常重要。在上述待修正参数中,质量密度的参数上下限为0~30%,主要考虑理论有限元模型建模并没有考虑防火隔音等装饰材料的质量以及节点和节点板的质量。故下限为0%,将装饰材料等质量等效为钢材质量,折算后可允许的上限为30%。外环、内环杆件的参数上下限为-30%~30%,主要是考虑外环和内环桁架为主受力杆件,且一些非主受力与桁架相交,对于此部分杆件弹性模量估计值的准确性没有把握,从工程允许误差确定了上下限为-30%~30%。径向杆件、非主受力杆件上下限:-20%~20%,主要是通过对比主受力杆件确定。

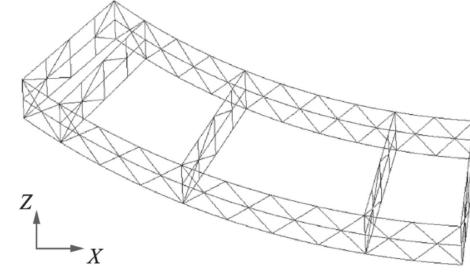


图8 主受力杆件

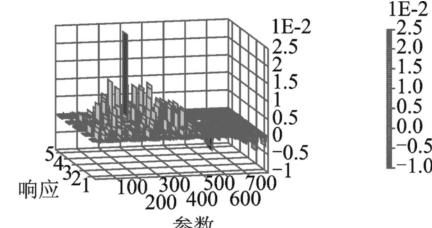


图9 参数敏感度分析

表2 待修正参数及初始估计值

参数类型	杆件数目/根	初始估计值	参数下限/%		参数上限/%	
			-30	+30	-30	+30
外环 HJ-01 弹性模量	108	2.06E11Pa	-30	+30		
内环 HJ-02 弹性模量	101	2.06E11Pa	-30	+30		
径向 HJ-03 弹性模量	50	2.06E11Pa	-20	+20		
径向 HJ-04 弹性模量	81	2.06E11Pa	-20	+20		
非主受力杆件 弹性模量	201	2.06E11Pa	-20	+20		
连廊底层杆件 质量密度	258	7 850 kg/m ³	0	30		

3.4 参数修正及结果分析

迭代收敛准则定为:理论计算频率与实测频率的第1阶误差不超过1%,其它阶的误差在5%以内。敏感度分析后作为修正参数的数目远大于目标函数

个数,设置迭代时参数修正量 Δp 规定不得超过 0.1%,迭代 90 次后结果收敛,用修正后的参数重新计算数值模型的模态参数,模态分析结果见表 3。

表 3 修正后计算模态参数与实测模态参数比较

模态阶数	实测频率 f_e/Hz	修正后计算频率 f_a/Hz	频率相对误差/%	振型相关性 MAC	振型描述
1	3.56	3.54	0.57	0.99	1 阶弯曲
2	4.81	4.86	1.12	0.99	2 阶弯曲
3	6.25	6.12	2.03	0.98	1 阶扭转
4	7.29	7.60	4.23	0.93	2 阶扭转
5	9.81	9.97	1.68	0.98	3 阶弯曲

表 4 修正后连廊总质量与实测连廊质量比较

实测连廊质量/kg	修正后模型质量/kg	误差/%
654 123	695 720	6.35

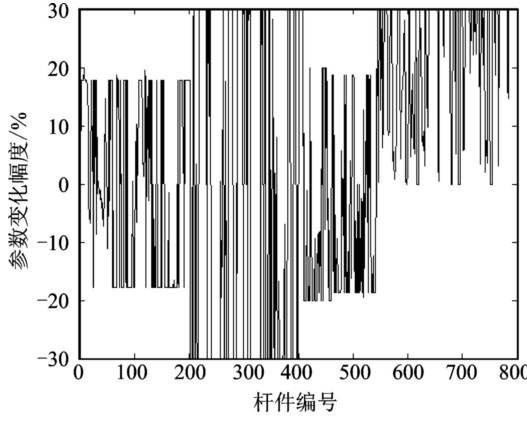


图 10 各参数变化幅度

从表 3 可以看出,第 1 阶频率误差减小至 1% 以内,高阶频率的误差也很大程度地减小,且各阶振型置信因子 MAC 值都有所提高,尤其是第 2 阶扭转振型置信因子由初始的 0.85 提高至 0.93;迭代过程中各参数均在设定的上下限值内变化。在图 10 中,编号 202-460 杆件代表内外环主受力杆件,由图中可知大部分杆件初始弹性模量和修正后弹性模量的变化幅度达到极限值,而非主受力杆件的弹性模量只有少数达到极限值,这说明了主受力杆件对于整个连廊结构的频率影响非常大;根据连廊吊装阶段获得的连廊总质量信息(见表 4),连廊实际质量约为 654 123 kg。修正后的连廊模型质量为 695 720 kg,两者之间的误差仅为 6.35%,可以认为修正后的连廊模型在自重作用下的支座竖向反力与实测值基本一致。

4 结 论

杭州市民中心高空钢结构连廊为巨型桁架、构件数量多且该工程坐落于钱塘江畔,连廊服役于长期承受风荷载的环境。准确了解结构真实动力特性为准确预测结构在风等动荷载条件下的动力响应提供重要依据。基于灵敏度分析和贝叶斯估计的方法对钢结构连廊数值模型进行了修正。

本文首先利用多种空间有限单元建立了杭州市市民中心 R1 高空连廊的三维有限元数值模型。基于该初始模型进行了模态分析,计算得到频率和振型等模态参数。然后在输入未知的情况下对高空连廊进行了环境振动测试,运用平均正则化功率谱密度的峰值法识别出连廊实际频率和振型。对理论模型动力特性与实际结构动力特性进行比较可知,两者之间的频率低阶频率误差较小,高阶误差较大,而振型相关性较好。最后以连廊前 5 阶实测频率为目标函数,选择连廊主受力杆件、一般受力杆件的弹性模量和底层杆件的质量密度作为修正参数,构造频率对设计参数的灵敏度矩阵,筛选出对频率敏感性大的参数,通过贝叶斯估计进行参数迭代修正获得最终模型,并以振型置信因子 MAC 来验证模型修正质量。

修正后模型的计算频率与实测频率都在设定的误差范围,第 1 阶频率误差为 0.57%,各高阶频率误差均在 5% 以内。修正过程中各参数均在设定的上下限值内变化,达到极限允许值的参数数目不多,且修正后振型置信因子 MAC 较初始 MAC 值有所提高,结果表明模型修正算法可以有效地修正大型钢结构的分析模型,修正后模型的计算模态参数与实测值基本吻合,较为准确地反映了结构真实的动力特性。

致谢:本文研究的动力测试试验得到了工程师刘沛、周争考、张深、刘永璨、贾京的支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Mottershead JE, Friswell MI. Model updating in structural dynamics: a survey [J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 167: 347–375.
- [2] Wu J R, Li Q S. Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 979–990.
- [3] 王锦文. 深圳市民中心屋顶网架结构的有限元模型修

- 正及模态参数识别[D]. 武汉:武汉理工大学, 2004.
- [4] 郭力, 韩晓林, 李兆霞. 基于环境振动测试的润扬桥塔模型修正[J]. 特种结构, 2003, 20(4): 68-70.
- [5] Lord J F, Ventura C, Dascotte E. Automated model updating using ambient vibration data from a 48-storey building in vancouver [A]. Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC) [C]. January 2004, Detroit, MI.
- [6] Pavic A, Hartley M J, Waldron P. Updating of the analytical models of two footbridges based on modal testing of full-scale structures [A]. The Twenty-third International Seminar on Modal Analysis [C]. Leuven, 1998, 1 111-1 118.
- [7] J M W Brownjohn. Dynamic assessment of a curved cable-stayed bridge by model updating[J]. Structural Engineering, 2000, 126 (2): 252-260.
- [8] Mottershead JE, Friswell MI. Finite Element Model Updating in Structural Dynamic [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1995.
- [9] Fox R L, Kapoor M P. Rate of change of eigenvalues and eigenvectors [J]. AIAA, 1968, 12(6): 2 426-2 429.
- [10] Link M, Qian Z. Updating substructure models with dynamic boundary conditions [A]. Design Engineering Technical Conference [C]. Boston, 1995, Part C, 3: 1 259-1 269.
- [11] Felber A J. Development of a hybrid evaluation system [D]. Vancouver: University of British Columbia; 1993.
- [12] Bendat J S, Piersol A G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

Finite element model updating of a long-span steel skybridge

ZHENG Yi-min¹, SUN Hua-hua¹, ZHAO Xin¹, CHEN Wei², ZHANG Rong-hai², SHEN Xu-dong²

(¹. Architectural Design & Research Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China;

². Headquarters of Hangzhou Citizen Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Hangzhou Citizen Center is a complex connected tall building, in which six hexadic-towers are connected to each other through six skybridges. The finite element model updating of the steel skybridge was conducted using the sensitivity-based and Bayesian estimation updating methods. The relative error of the frequencies and Modal Assurance Criterion (MAC) values of the modal shapes were firstly computed, then the dynamic characteristic differences between numerical model and real structure were obtained by comparing the calculated modal parameters and the estimated modal parameters through dynamic testing under the ambient excitation. The sensitivity matrix was constructed through differential computation for modal parameters with respect to all selected structural parameters and then the insensitive parameters were sieved. The parameter weighting matrix and response weighting matrix were obtained using the Bayesian estimation method. Based on the confidence values of initial designed parameters, the allowable lower and upper bounds were applied for the parameters values. The iterative updating procedure was conducted according to the convergence criterion. From the updating results, it is found that there was a good correlation between the dynamic characteristics of updated model and estimated dynamic characteristics through dynamic testing. The updated model can then be used for vibration control, response prediction and condition assessment of the skybridge in future.

Key words: sensitivity analysis; finite element model updating; connected tall building; steel skybridge; Bayesian estimation

作者简介: 郑毅敏(1957-), 男, 教授级高工。电话:(021)65987788; E-mail:22zym@tjadri.com