

对金茂大厦“粗指纹”诊断初探

徐永林¹, 朱元清¹, 周晶矛², 范宜瑶³, 秦浩文¹, 阮镇基⁴, 干劲⁴

(1. 上海市地震局, 上海 200062; 2. 上海市北郊高级中学, 上海 200081;

3. 华东师范大学附属东昌中学, 上海 200120; 4. 中国金茂集团有限公司工程部, 上海 200121)

摘要:金茂大厦是目前中国最高建筑之一, 高达420.5 m。本文采用自回归移动平均 ARMA 模型, 利用大厦的随机振动得到其某些振型的频率及阻尼比, 在地震、台风过后或经一长段时间之后, 看其相应振型频率和阻尼比的变化, 以达到健康诊断之目的。结果显示此法具有很好的可操作性, 可用于大厦、大桥等的“粗指纹”健康诊断和维护。

关键词: 金茂大厦; 健康诊断; 振型频率; 阻尼比

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2010)02-0169-04

Preliminary Healthy Diagnosis on Jinmao Tall Building

XU Yong-lin¹, ZHU Yuan-qing¹, ZHOU Jing-mao², FAN Yi-yao³,

QIN Hao-wen¹, YUAN Zhen-ji⁴, GAN Jin⁴

(1. Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China;

2. North-Suburb Senior High School of Shanghai, Shanghai 200081, China;

3. Donchang Senior High School Attached to East-China Normal University, Shanghai 200120, China;

4. Engineering Department of Jin-Mao Inc. China, Shanghai 200121, China)

Abstract: Jinmao tall building is one of highest building in China with height of 420.5 m. For diagnosing the building's healthy status, in other words, its safety, the frequencies of vibration types and damping are obtained from the building vibration by the Auto-regressive and Moving Average Model, and the frequencies and damping before and after earthquake or typhoon, or existing for a long period are compared. The result shows that this method is well manipulated and used in healthy diagnosis and maintenance for tall buildings and big bridges.

Key words: Jinmao tall building; Healthy diagnosis; Frequency of vibration type; Damping

0 引言

重大工程项目如水坝、桥梁、电厂、超高层建筑等, 在遭受地震、洪水、飓风、火灾等自然灾害时的安全问题已引起人们的广泛关注。当重大构筑物遭受这些极端灾害后, 对其健康状况做出评估也是非常重要的和有现实意义的。它对结构的损坏与否、安全性以及维护能作出客观的评价, 以便正确地采取措施。因此结构的健康监测和诊断成为当前国内外研究的热点问题。

每座构筑物都有自己的动力特性及响应, 当结

构经过极端灾害后或较长时间运行后, 一些构件受损或老化, 这势必影响其动力特性及响应, 因此可通过一定的方法检测出其某些动力特性参数的变化, 如结构振型相应的频率及阻尼比的变化等。健康诊断分“粗指纹”健康诊断、详细全面诊断和局部构件的诊断。前者指从整体粗线条看其动力特性参数的变化, 观整幢大厦或其他构筑是否受损; 后面两种诊断是通过各部件由于受损或老化而引起的局部强度等的变化, 通过建模正演或反演及局部无损检测的方法完成检测。

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 上海市科委科学基金(032512074)

作者简介: 徐永林(1960-), 男(汉族), 江苏吴江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震学及地震工程学研究。

上海金茂大厦是目前中国最高建筑之一,占地面积 23 611 m²,建筑面积 287 360 m²,主楼地面以上高度 420.5 m,也是世界超高建筑物之一。该大厦是一幢综合性多功能的建筑物,拥有甲级办公楼和超星级酒店,是世界上硬件设施先进的经济、金融、贸易活动场所,每天有上万人在楼内活动。它不仅是上海的一个标志性建筑物之一,还是一个人员密集、商业繁荣的城市中心和旅游景点。

金茂大厦主楼平面基本呈正方形,建筑物高宽比约 8:1。平面结构规则且双向对称,竖向布置均匀,没有过大的内收,构件截面由下而上逐渐减小,无突变。金茂大厦在 230-382 m 处有一中庭,净高 152 m,在 233.5 m 处有一空中游泳池。其主楼结构形式为核芯筒复合巨型柱钢-混凝土组合结构。沿楼高三道强劲的钢结构外伸桁架将中央核芯筒和外围的复合巨型柱连成整体,构成主要的竖向承重体系,并抵抗风荷载和地震作用。与超高层钢结构不同的是,金茂大厦混凝土核芯筒提供了极好的质量和刚度以及在动力阻尼特性,因此没有另行设置阻尼装置。

本文主要讨论用强震仪所得振动时程对金茂大厦进行“粗指纹”健康诊断。思路是:用数据分析中自回归移动平均 ARMA 模型计算大厦某些振型的频率及阻尼比,每隔一段时间计算一次,看其有何变

化。若某些振型的频率明显变小和相应阻尼比明显变大,说明其与其相关的部件受损或老化,可通过对应的振型有针对性地查找受损部位。该方法的关键是要求计算结果稳定性好。从所得某些振型的频率和阻尼比来看,计算结果非常稳定,所以用上述方法对金茂大厦的“粗指纹”诊断是可行的,该方法在对其长期维护管理中,必然取得成效。

1 数据资料的选取

金茂大厦目前有两套系统观测其风振或其他引起的振动:其一是 2000 年安装的四套美国 kinematics 公司生产的 Etna 强震仪,分别安装在地下第二层、第 30 层、第 51 层和 ph2 层(第 90 层);其二是一套用倾斜仪测量其大位移的系统,2005 年 6 月正式开始运行,共在 10 个层面安装了倾斜仪(分别安装在第 10 层、第 20 层、第 30 层、第 40 层、第 51 层、第 58 层、第 65 层、第 72 层、第 79 层和第 86 层),每个层面有两套倾斜仪分别测量 x 和 y 方向的倾斜量。每层的仪器安装在核芯筒内的统一方向、统一位置的承重墙上,每个传感器把模拟信号传至数据中心,由数采仪集中统一 A/D 转换,最后定量算出风振或其他振动引起的位移。

Etna 强震仪的数据记录的年限较长,而另一套大位移测量系统记录年仅 3 年多。为了使结果有比

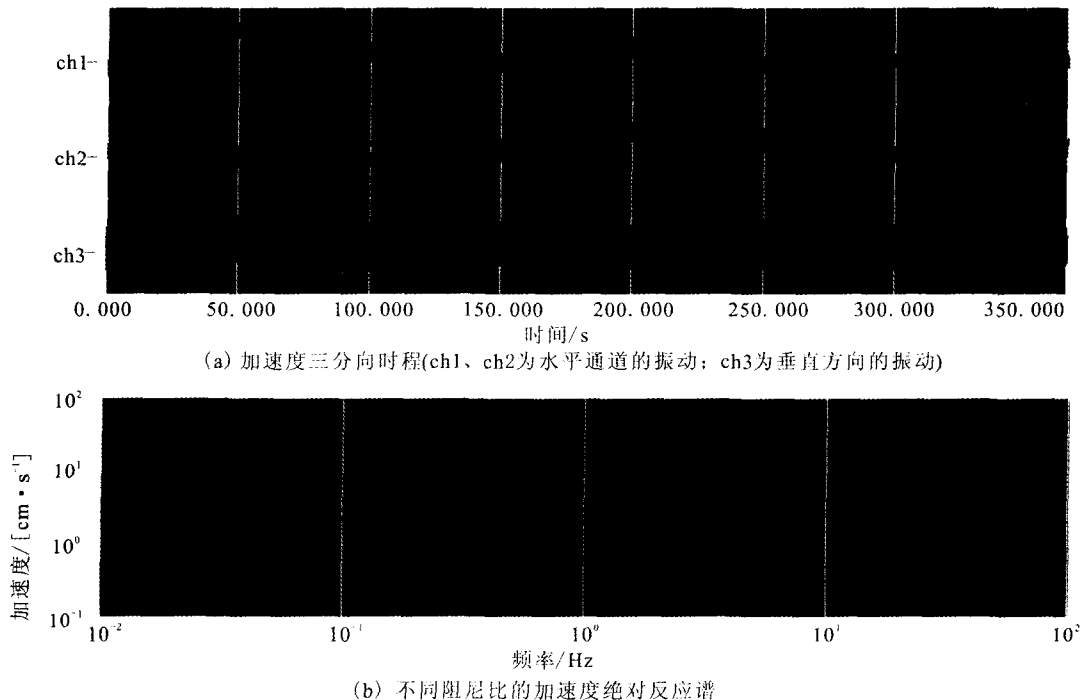


图1 Etna记录的金茂大厦加速度时程和反应谱。

Fig. 1 The acceleration history and acceleration response spectrum recorded in Jinmao-high building by Etna.

较,故数据分析选 Etna 强震仪记录的数据,分析了 2002、2004、2005 和 2006 年的记录数据。

金茂大厦强震仪记录的时程和加速度反应谱见图 1。这里只展示了其中的一幅加速度绝对反应谱图。事实上不同时间段的加速度绝对反应谱图与上幅展示的形态基本一致。在图中某些固有频率上幅值较大者,就是所谓大厦的不同振型对应的固有频率(周期)。

由此可见,大厦具有一定能量振动的振型较丰富,在下面用 ARMA 模型计算其振型频率和阻尼比时,不对所有激发的振型进行求解,只对能量较大的振型进行分析,讨论用该方法对大厦进行“粗指纹”诊断和维护的可行性。

2 应用振动时程计算振型频率和阻尼比

设振动信号为平稳随机信号且各态历经。方法的基本思路是:由振动系统动力学方程的关系,以及自回归移动平均 ARMA 模型的基本性质,获得振动系统的特征值,进而得到振动系统的固有频率和阻尼比。

设大厦某位置某水平方向加速时程为: $x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-n}$, 根据数理统计理论对上述数据建立自回归-移动平均模型 ARMA(n, m):

$$x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \dots - \varphi_n x_{t-n} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_m a_{t-m}$$

其中: $\varphi_i, \theta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为模型参数; a_t 为独立正态分布的随机量,即称零均值白噪声; n, m 为模型阶次。一般形式为

$$\varphi(B)x_t = \theta(B)a_t$$

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_n B^n$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_m B^m$$

其中 B 为后移算子。将 $\varphi(B)$ 分解为

$$\varphi(B) = (1 - \eta_1 B)(1 - \eta_2 B) \dots (1 - \eta_n B)$$

式中 $1/\eta_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为 n 阶差分方程的特征根,令 $1/\eta_k = \lambda_k$, 则 λ_k , 由下列方程求得

$$\lambda^n - \varphi_1 \lambda^{n-1} - \varphi_2 \lambda^{n-2} - \dots - \varphi_n = 0$$

设 $\lambda_k = \lambda_k^R + i\lambda_k^I (i$ 为虚数单位), 振动系统的特征根为 $R = R_k^R + iR_k^I$, 有

$$R_k^R = -\ln((\lambda_k^R)^2 + (\lambda_k^I)^2)^{1/2}/\Delta t$$

$$R_k^I = \arccos(\lambda_k^I / ((\lambda_k^R)^2 + (\lambda_k^I)^2)^{1/2})/\Delta t$$

式中 Δt 为振动信号的采样间隔。振动系统的振型固有频率 f_k 和阻尼比 ξ_k 为

$$f_k = ((R_k^R)^2 + (R_k^I)^2)^{1/2}/2\pi$$

$$\xi_k = -R_k^R / ((R_k^R)^2 + (R_k^I)^2)^{1/2}$$

编程计算一个例子,检验程序计算是否正确。

设小阻尼单自由度体系的自由振动可以写为

$$u(t) = A \cdot \exp(-\xi\omega_0 t) \sin(\omega t + \theta)$$

其中 $\omega = \omega_0(1 - \xi^2)^{1/2}$ 为有阻尼自振圆频率; ξ 为阻尼比。

令

$$\omega_0 = 1.0, \xi = 0.05;$$

$$\omega_0 = 2.345, \xi = 0.03$$

两组数据相应解得

$$\omega_0 = 0.9999, \xi = 0.0500;$$

$$\omega_0 = 2.3450, \xi = 0.0299.$$

计算完全正确。这里还检验了几个频率及相应阻尼比的组合,计算结果同样正确无误。通过计算得到金茂大厦三阶振型相应的频率及阻尼比,特别是基阶振型的频率及阻尼比非常稳定,更显结果可靠可信(表 1)。

表 1 金茂大厦三阶振型的频率和阻尼比

固有频率	年份	NS 向			EW 向		
		f/Hz	T/s	ξ	f/Hz	T/s	ξ
f_1	2002	0.147 1	6.798	0.036 9	0.146 4	6.831	0.033 4
	2004	0.146 6	6.821	0.040 0	0.145 8	6.859	0.045 8
	2005	0.145 6	6.868	0.042 0	0.145 0	6.897	0.047 6
	2006	0.145 5	6.873	0.041 9	0.144 8	6.906	0.047 7
f_2	2002	0.579 8	1.725	0.044 0	0.579 0	1.727	0.055 8
	2004	0.589 4	1.697	0.021 7	0.572 4	1.747	0.031 3
	2005	0.566 8	1.764	0.024 0	0.564 5	1.771	0.031 5
	2006	0.566 4	1.766	0.025 0	0.564 3	1.772	0.031 4
f_3	2002	1.976 3	0.506	0.045 9	1.971 3	0.507	0.034 3
	2004	1.988 4	0.503	0.077 0	1.980 1	0.505	0.105 6
	2005	1.954 4	0.512	0.059 0	1.940 3	0.515	0.033 9
	2006	1.954 3	0.512	0.059 9	1.940 0	0.515	0.034 1

注:表中 2005 年的数据是在“麦莎”台风之后 9 月份记录的。“麦莎”是一次影响上海较大的台风,中心城市许多行道树被刮倒

3 几年来固有频率及阻尼比的变化比较

从上面得到的结果可以看出:

(1) 金茂大厦东西、南北主体结构对称极好。

(2) 从比较一阶固有频率 f_1 的变化可以看出,这些年来其缓慢地变小,即一阶固有周期缓慢变大,这可能与其负重不断增加有关。值得注意的是这阶频率在“麦莎”台风前后变化速率明显加快。

(3) 表中固有频率 f_2 和 f_3 的变化速率在往年较小,但在“麦莎”台风前后变化速率也明显加快。

(4) 一阶固有频率 f_1 的阻尼比随固有周期缓

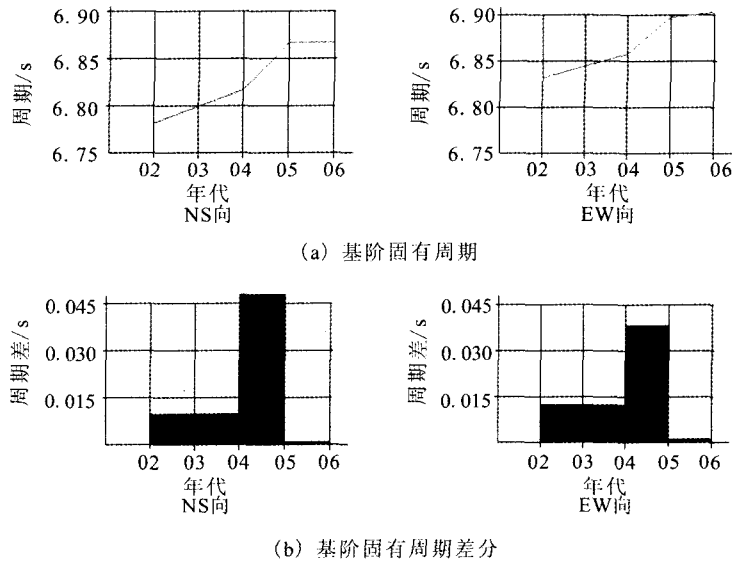


图2 金茂大厦几年来基阶固有周期变化和年与年的基阶固有周期差分

Fig. 2 The basic period changes of acceleration time histories and the basic period difference of every year in several years.

慢变大也略有加大,其他频率没有这么明显的规律。

4 结果讨论和分析

(1) 尽管间隔一年给出一组结果,但实际上一年中我们多次对振动信号采样,并对多次结果取平均,每次采样时间都在几百秒时间长度,以确保大厦振动特性的稳定性和结果的可靠性。计算的结果不但振型频率稳定性好、一致性好,而且相应阻尼比值一致性也很好,特别是基阶振型。这正是我们期望的,只有这样才有可能用这些数据对大厦进行跟踪,以便判断大厦是否有“暗伤”,从而进行诊治修复和加固。

(2) 从理论上讲用模态分析方法得到的振型频率分辨率比 Fourier 谱高得多。往往大厦受到强风、地震损坏后,振型频率变化 Δf (频率向低频变化,阻尼变大)不会很大,因此频率分辨率高是至关重要的,这就是为什么用该方法的所在。

(3) 为了提高所获振型频率和阻尼比的精度,这里采用多次所得结果取平均以确保结果精度。因为上面已经提到,构筑物的振型频率和阻尼比的大小与其振动的幅值有一定的关系,尽管用的振动资料的幅值有所选择,尽可能选相差不大的,但每个样本中振动幅值的大小还是有所不同,这就是为什么尽可能取多一些样本和对所得结果取平均的原因。

(4) 根据本文的分析结果,“麦莎”台风前后上

述三阶振型相应的周期变化率明显与别的阶段不同。是否钢结构连接处有细微的变化、漆或涂层有无脱落或裂缝等等,应仔细检查,发现问题及时解决。这正是该“粗指纹”检测方法的意义所在。

5 结语

本文是用模态分析法对金茂大厦进行“粗指纹”健康无损诊断,虽然用此法不能指出暗伤具体的位置,但通过其动力特性的变化确能了解它的总体健康状况,以便极时维护。

最好每年做这样一次无损探测,随着资料的积累,对大厦的健康跟踪及维护管理是极有好处的。

[参考文献]

- [1] 刘德贵,费景高,于泳江,等. Fortran 算法汇编[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [2] 邹理和. 数字信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [3] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [4] 石伟. 数据仓库技术在地震信息系统中的应用[J]. 西北地震学报,2006,28(3),377-378.
- [5] 李英,张淑贞,许康生. 小波降噪方法在地震信号处理中的应用[J]. 西北地震学报,2006,28(2),159-162.
- [6] Daryl W Boggs, Noriaki Hosoya, Leighton Cochran. Sources of Torsional Wind Loading on Tall Building: Lessons from the Wind Tunnel Advanced Technology in Structural Engineering[M]. SEL/ASCE, Section 22, Chapter 3, 2000, 85-93.
- [7] S L Lee, S Swaddiwudhipong. Conceptual Design and Wind Load Analysis of Tall Building[J]. Computational Structural Engineering An International Journal, 2001, 1(1):178-185.