

上海环球金融中心顶部风速和加速度实测

黄雅君, 顾 明, 黄子逢

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于 2011—2016 年上海环球金融中心(SWFC)顶部风速和加速度的长期监测数据,对动力响应和动力特性进行了分析.采用包络线随机减量的方法计算超高层建筑的水平向一阶自振频率与一阶阻尼比,分析结构动力响应随风速的变化规律以及动力特性随振幅的变化规律.结果表明:上海环球金融中心顶部加速度标准差随平均风速呈幂函数形式增加,一阶自振频率随顶部振幅的增加而减小,一阶阻尼比随顶部振幅的增加而增加.

关键词: 超高层建筑; 现场实测; 动力特性; 动力响应

中图分类号: TU317.2; TU312.1

文献标志码: A

Field Measurement of Wind and Acceleration on Shanghai World Financial Center

HUANG Yajun, GU Ming, HUANG Zifeng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the measured data of wind speeds and acceleration responses at the top of the Shanghai World Financial Center (SWFC) during the period from 2011 to 2016, the dynamic responses and dynamic properties were analyzed. The fundamental natural frequencies and damping ratios were identified by the envelope random decrement technique. The variations of dynamic responses with wind speed and the variations of dynamic properties with vibration amplitude were studied. The findings demonstrate that the standard deviation of acceleration increases in function of power along with wind speed, the fundamental natural frequencies decrease with the increases of vibration amplitude, while the fundamental natural frequencies decrease with the increases of vibration amplitude.

Key words: super-tall building; field measurement; dynamic properties; dynamic responses

近年来,随着新材料、新技术和新结构形式的应用,全球出现了许多超高层建筑.随着建筑高度的增加,风荷载增加并且结构柔度变大,抗风设计成为超高层建筑设计的主导因素.原型实测是研究结构风效应最直接和最可靠的手段.在过去的 30 年里,相关研究人员进行了许多高层建筑风致响应的现场实测工作^[1-6].圣母大学和西安大略大学对芝加哥 4 栋高楼进行了实测^[7-8],香港城市大学对中国香港、中国台湾以及大陆 10 栋高楼进行了实测^[9-18],香港理工大学对帝王大厦^[19]和广州塔^[20]进行了实测,同济大学对上海环球金融中心(SWFC)^[21-22]进行了实测.

目前大多数实测研究只分析了某次台风下超高层建筑的动态响应和动力特性,实测数据的时间跨度不够大,几乎没有包含大量风事件,难以全面获得超高层建筑风致响应规律.因此,对超高层建筑风致响应进行长期观测,通过大量响应数据对超高层建筑的动态响应和动力特性进行全面、深入的分析就很有必要.

本文基于 2011—2016 年上海环球金融中心顶部风速及加速度的长期观测数据,采用包络线随机减量方法^[23]获得了结构水平向一阶自振频率和一阶阻尼比,分析了结构动力响应随风速的变化规律和动力特性随振幅的变化规律.

1 上海环球金融中心及其顶部风速、加速度实测概况

上海环球金融中心位于上海市浦东新区陆家嘴金融核心区,高度为 492 m,地上总共有 101 层,周边建有众多超高层建筑,地貌极其复杂,如图 1 所示.上海环球金融中心为巨型柱-核心筒-伸臂结构体

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(90715040,91215302)

第一作者: 黄雅君(1992—),女,博士生,主要研究方向为高层建筑风致响应分析. E-mail:102894hunag@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾 明(1957—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为结构抗风、数值风洞以及结构振动控制.

E-mail:minggu@tongji.edu.cn

系,采用如下三重抗侧力结构体系共同承担由风和地震引起的倾覆力矩:巨型柱、巨型斜撑和周边带状桁架构成的巨型框架结构,钢筋混凝土核心筒,连接核心筒和巨型结构柱间的伸臂桁架^[23]. 为了提高上海环球金融中心遭遇强风时大厦酒店和办公区人员使用环境的舒适性,上海环球金融中心采用了一组由三菱重工开发的主动质量调谐阻尼器(ATMD). 两个 ATMD 对称地安装在第 90 层(约 395 m)的东北端和西南端,用以降低结构顶部的水平振动和扭转响应.

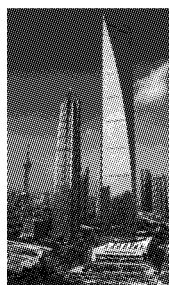
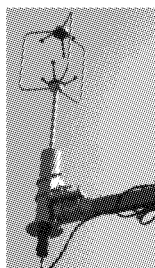


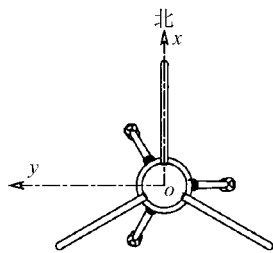
图 1 上海环球金融中心全景及周边建筑

Fig.1 Panorama and surrounding construction of SWFC

笔者在上海环球金融中心第 101 层上(492 m)安装了一个加速度采集仪,在楼顶(494 m)的东北角和西南角都安装了一个超声波风速仪和一个螺旋桨风速仪. 加速度采集仪为 LACC-1 型超低频微加速度无线测量仪,采样频率为 25 Hz,采样精度为 0.01 mg,采样量程为 ± 78.125 mg. 采集仪两个水平正交主轴 x 和 y 与大楼的两个主轴 X 和 Y 平行. 超声波风速仪为 WindMaster Pro 超声波风速仪,采样频率为 10 Hz,风速量程为 $0.01 \sim 65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,超声波风速仪及其 x 和 y 轴定义见图 2. 螺旋桨风速仪型号为 Young 05103-5,采样频率为 1 Hz,风速量程为 $0 \sim 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,螺旋桨风速仪见图 3. 大楼的 X 和 Y 主轴方位、风向角以及风速仪在顶楼的位置见图 4. 风向定义为正北 0° ,俯视逆时针方向为正.



a 风速仪



b x 和 y 轴定义

图 2 WindMaster Pro 超声波风速仪及其 x 和 y 轴定义
Fig.2 WindMaster Pro ultrasonic anemometer and its definition of x - and y -axis

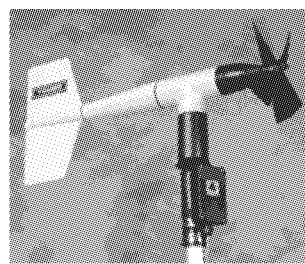


图 3 Young 05103-5 螺旋桨风速仪

Fig.3 Young 05103-5 wind monitors

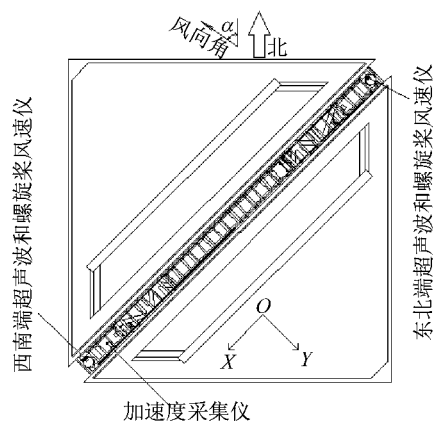


图 4 风速仪安装方位

Fig.4 Location of the anemometers

2 数据处理

本文基于 2011—2016 年上海环球金融中心顶部风速和加速度响应实测数据,对上海环球金融中心的风致响应和结构动力特性进行分析. 本文对超声波风速仪实测数据进行分析,并用螺旋桨风速仪实测数据进行校核,以保证超声波风速仪实测数据的有效性. 由于加速度采集仪的精度为 0.01 mg,幅值过小的加速度数据的测量误差较大. 因此,本文剔除了加速度标准差小于 0.01 mg 的加速度时程数据. 当上海环球金融中心振幅过大时,安装在第 90 层的 ATMD 会启动,增加了上海环球金融中心的总阻尼比. 为了去除 ATMD 的影响,本文分析时不考虑阻尼器打开时的加速度时程数据. 基于上述数据的筛选原则,本文选取了 3 220 h 的上海环球金融中心 X 方向加速度数据和 4 660 h 的 Y 方向加速度数据以及相应的风速时程进行分析.

2.1 一阶自振频率和一阶阻尼比

本文采用包络线随机减量法^[24]识别上海环球金融中心的一阶自振频率和一阶阻尼比,具体步骤如下:

(1) 运用解析模态分解法^[25]对响应时程进行滤

波,求得一阶模态加速度响应时程 $a(t)$,采用 Hilbert 变换获得时程 $a(t)$ 的包络线幅值 $A(t)$ 。

(2) 截取包络线幅值 $A(t)$ 累积概率分布 30% 以上的点 $A(t_i)$,对应到时程上的点为 $a(t_i)$, i 为截取的点数, $i=1,2,\dots,N$ 。

(3) 对于每个时间点 t_i ,获得其后连续 5 个周期的时程 $a(t_i+\tau)$,共获得 N 个时程数。

(4) 将加速度时程 $a(t)$ 和包络线幅值 $A(t)$ 倒转,按照步骤(2)和(3)同样获得 N 个时程 $a'(t_i+\tau)$ 。

(5) 计算待拟合的自由衰减曲线。

(6) 对自由衰减曲线 $D(\tau)$ 拟合,得到一阶自振频率和一阶阻尼比。

2.2 平均风速与平均风向

根据矢量分解法,平均水平风速 U 和平均水平风向角 ϕ 由式(1)和(2)计算得到,如下所示:

$$U = \sqrt{u_x(t)^2 + u_y(t)^2} \quad (1)$$

$$\cos \phi = \overline{u_x(t)} / U \quad (2)$$

式中: $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 分别为超声波风速仪测得的 x 轴和 y 轴方向风速。

3 上海环球金融中心动力响应及动力特性分析

3.1 加速度标准差与平均风速相关性

本节以 10 min 为基本时距对风速和加速度数据进行分割.当平均风速小于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,由于风速较小,上海环球金融中心振动不明显,加速度标准差与平均风速相关性也不明显.因此,本节选取平均风速大于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速时程及其对应的加速度响应进行分析。

为了剔除风向角的影响,本文将全风向分为 16 个风向区间,分别对每个风向角区间内的加速度标准差随平均风速的变化规律进行分析.由计算可以得知,所有风向角区间内加速度标准差均随平均风速增大而增大.本文选取具有代表性的风向角区间 $236.25^\circ \sim 258.75^\circ$ 内的结果进行分析。

风向角为 $236.25^\circ \sim 258.75^\circ$ 时,加速度标准差

随平均风速的变化规律如图 5 所示.本文采用如下形式对加速度响应进行幂函数拟合:

$$\sigma_a = c_1 U^{c_2} \quad (3)$$

式中: σ_a 为加速度标准差; c_1 和 c_2 为拟合系数,代表了加速度标准差对平均风速的敏感性。

由图 5 拟合曲线可知,当平均风速从 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, X 向加速度标准差从 0.058 mg 增大到 0.272 mg ; Y 向加速度标准差从 0.075 mg 增大到 0.475 mg 。

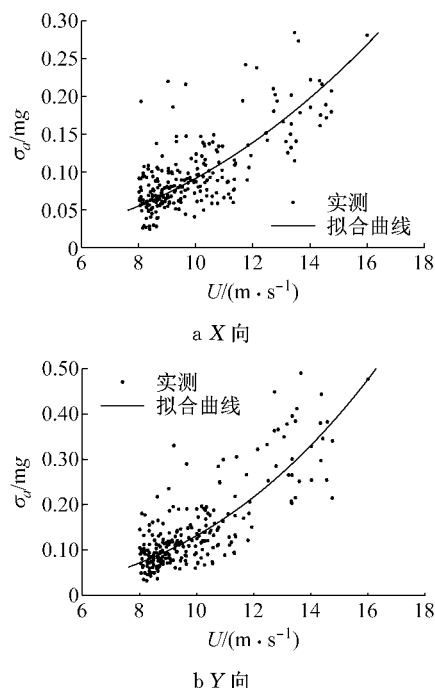


图 5 风向角为 $236.25^\circ \sim 258.75^\circ$ 时加速度标准差随平均风速的变化

Fig. 5 Relationship between standard deviation of acceleration and average wind speed in wind angle of $236.25^\circ \sim 258.75^\circ$

本文根据实测结果给出了拟合参数 c_1 和 c_2 , 和其他高层建筑进行对比,如表 1 所示.由于高层建筑不同的建筑外形、周边地貌和动力特性等,相同风速下其加速度响应大小不同.因此,表 1 中不同高层建筑之间的拟合参数不同.但是,不同超高层建筑顶部两个方向的加速度标准差随平均风速以幂函数形式增加的规律一致,并且指数 c_2 接近,其范围为 2~4。

表 1 上海环球金融中心和其他高层建筑拟合参数 c_1 和 c_2

Tab.1 Comparison of coefficients c_1 and c_2 between Shanghai World Financial Center and other super-tall buildings

高层建筑名称	主体结构高度/m	结构类型	X 向 $c_1 /$ ($\text{mg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$)	X 向 c_2	Y 向 $c_1 /$ ($\text{mg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$)	Y 向 c_2
中信广场 ^[15]	391	混凝土	2.26×10^{-5}	2.90	7.03×10^{-6}	3.23
帝王大厦 ^[15]	325	型钢-混凝土	2.55×10^{-5}	3.31	4.53×10^{-6}	3.72
广州西塔 ^[16]	432	型钢-混凝土	4.14×10^{-8}	4.00	3.78×10^{-8}	4.00
上海环球金融中心	492	型钢-混凝土	4.62×10^{-4}	2.30	2.44×10^{-4}	2.73

3.2 一阶自振频率随振幅的变化

为了满足随机减量法识别系统参数时对数据量的要求,后文均以 2 h 为分析时距.对每段 2 h 加速度响应时程,本文采用随机减量法识别出一阶自振频率,求出响应时程加速度标准差,并以此为振幅,将一阶自振频率与加速度标准差一一对应,分析一阶自振频率与振幅的相关性.

图 6 为一阶自振频率随振幅的变化规律.本文采用最小二乘法,按照下式对一阶自振频率进行线性拟合:

$$f = \alpha_0 z + \alpha_1 \quad (4)$$

式中: z 为振幅; f 为一阶自振频率; α_0 和 α_1 为回归系数,其中 α_0 代表一阶自振频率随振幅的变化速率, α_1 代表振幅为零时结构的一阶自振频率.

由图 6 实测数据可知,两个方向的一阶自振频率均随振幅的增大而减小.由拟合直线可知,当 X 向振幅从 0.01 mg 增大到 0.35 mg 时,X 向一阶自振频率从 0.151 2 Hz 下降到 0.150 1 Hz,降幅为 7.3‰;当 Y 向振幅从 0.01 mg 增大到 0.50 mg 时,Y 向一阶自振频率从 0.153 5 Hz 下降到 0.152 4 Hz,降幅为 7.5‰.He 等^[18]采用幅值加权和时间加权两种随机减量方法,识别出在 ATMD 未启动时,上海环球金融中心 X 向一阶自振频率均为 0.151 Hz,Y 向一阶自振频率分别为 0.153 Hz 和 0.154 Hz,这与本文结果接近.在上海环球金融中心设计阶段,相关设计单位采用 SAP2000 对建筑整体结构进行分析,得到其 X 向和 Y 向一阶自振频率分别为 0.151 Hz 和 0.154 Hz^[26],与实测结果一致.

本文根据实测结果给出了拟合参数 α_0 和 α_1 ,并和其他高层建筑进行对比,如表 2 所示.由表 2 可知,由于不同高层建筑的主体结构高度和结构类型

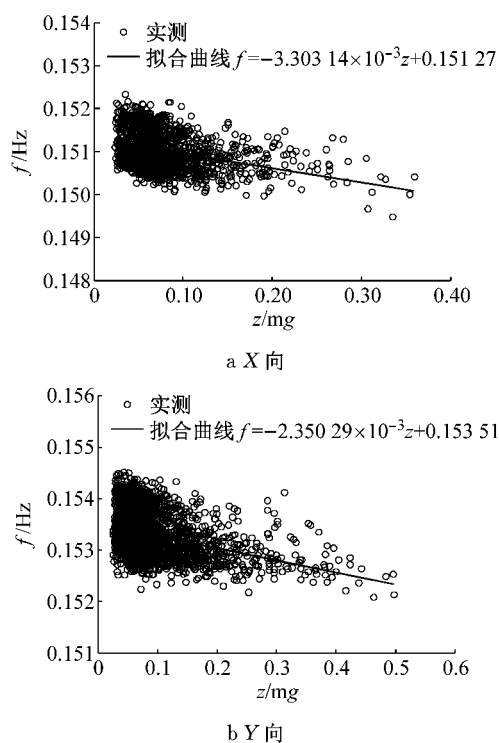


图 6 一阶自振频率随振幅的变化

Fig. 6 Variation of natural frequencies for fundamental mode with vibration amplitude

等不同,其一阶自振频率的振幅相关性大小不同,因此其拟合系数 α_0 不同. α_0 的值基本接近,范围为 $-4 \times 10^{-3} \sim -2 \times 10^{-3} \text{ Hz} \cdot \text{mg}^{-1}$,表明各超高层建筑的一阶自振频率均随振幅增大而减小,且变化速率基本一致.系数 α_1 的范围基本为 0.1~0.2 Hz,表明各超高层建筑刚度较小.当结构振动较大时,结构产生的非线性响应、钢节点滑移以及结构构件与非结构构件相互作用增大等因素,可能导致结构刚度减小^[27],因此结构的一阶自振频率随振幅增大而减小.

表 2 上海环球金融中心(SWFC)和其他高层建筑拟合参数 α_0 和 α_1

Tab. 2 Comparison of coefficients α_0 and α_1 between SWFC and other super-tall buildings

高层建筑名称	主体结构高度/m	结构类型	X 向 α_0 / (Hz \cdot mg $^{-1}$)	X 向 α_1 / Hz	Y 向 α_0 / (Hz \cdot mg $^{-1}$)	Y 向 α_1 / Hz
广州塔 ^[20]	454	钢结构	-3.6×10^{-3}	0.092	-3.0×10^{-3}	0.092
S1 ^[8]	264	混凝土	-2.7×10^{-3}	0.199	-2.3×10^{-3}	0.208
C1 ^[8]		钢结构	-1.9×10^{-3}	0.144	-3.4×10^{-3}	0.208
C2 ^[8]		混凝土	-6.2×10^{-3}	0.183	-2.0×10^{-2}	0.186
C3 ^[8]		钢结构	-3.0×10^{-3}	0.120	-2.9×10^{-3}	0.120
上海环球金融中心	492	型钢-混凝土	-3.3×10^{-3}	0.151	-2.4×10^{-3}	0.154

注: S1 为韩国首尔一栋超高层居民楼; C1~C3 为芝加哥监测系统中(Chicago Monitoring Program)的三栋高层建筑.

3.3 一阶阻尼比随振幅的变化

对每段 2 h 加速度响应时程,本文采用随机减量法识别出一阶阻尼比,求出响应时程加速度标准差,并以此为幅值,将一阶阻尼比与加速度标准差一

一对应,分析一阶阻尼比的振幅相关性.

图 7 为一阶阻尼比随振幅的变化规律.本文采用最小二乘法,按照式(5)形式对一阶阻尼比进行线性拟合,如下所示:

$$\xi = \beta_0 z + \beta_1 \quad (5)$$

式中: β_0 和 β_1 为回归系数,其中 β_0 表示一阶阻尼比随振幅变化速率, β_1 表示振幅为零时结构的一阶阻尼比。

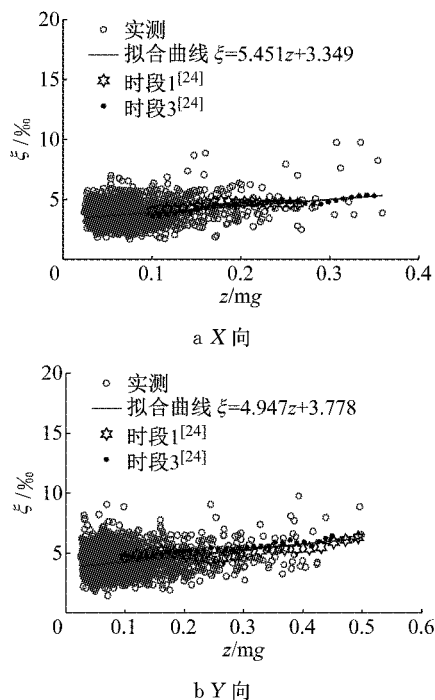


图7 一阶阻尼比随振幅的变化

Fig.7 Variation of damping ratios for fundamental mode with vibration amplitude

由图7实测数据可知,当振幅较小时,两个方向的一阶阻尼比范围为2‰~6‰;一阶阻尼比随振幅增大而增大。He等^[18]采用幅值加权和时程加权两种随机减量方法,识别出在ATMD未启动时,上海

环球金融中心X向一阶阻尼比分别为5.17‰和5.84‰,Y向一阶阻尼比分别为4.10‰和3.45‰,都在本文一阶阻尼比范围内。由图7拟合直线可知,当X向振幅从0.03 mg增大到0.35 mg时,X向一阶阻尼比从3.51‰增大到5.27‰;当Y向振幅从0.03 mg增大到0.50 mg时,Y向一阶阻尼比从3.93‰增大到6.25‰。Huang等^[24]发现:在台风Haikui作用下,ATMD未开启时(时段1和时段3),上海环球金融中心一阶阻尼比同样随振幅增大而增大。由图7可知,本文拟合直线与时段1和时段3实测数据重合较好。He等^[18]采用随机减量方法,处理了台风Muifa作用下,上海环球金融中心加速度响应时程,同样得到了阻尼比随振动幅值增大而增大的规律。当振幅从0.12 mg增大到0.35 mg时,Y向一阶阻尼比从5.0‰增大到17.8‰。由于He等^[18]处理的数据是ATMD间断性启动时上海环球金融中心顶部加速度数据,故阻尼比本文结果大。上海环球金融中心正常使用状态下的阻尼比设计值为2‰^[26],比本文实测值大。

本文根据实测结果给出了上海环球金融中心和广州塔的拟合参数 β_0 和 β_1 ,如表3所示。由表3可知,除广州塔X方向 β_0 较大,其他 β_0 的范围基本为5~7‰·mg⁻¹,表明上海环球金融中心与广州塔的一阶阻尼比随振幅增大而增大的速率基本一致;参数 β_1 的范围基本为3‰~5‰,表明上海环球金融中心与广州塔的一阶阻尼比较小。Jeary^[28]认为一阶阻尼比随振幅增大是因为随着振幅的增加,结构裂缝增多并且增大,造成结构耗能增大,进而结构阻尼比增加。

表3 上海环球金融中心和广州塔拟合参数 β_0 和 β_1

Tab.3 Comparison of coefficients β_0 and β_1 between SWFC and Canton Tower

高层建筑名称	主体结构高度/m	结构类型	X向 β_0 / (‰·mg ⁻¹)	X向 β_1 / ‰	Y向 β_0 / (‰·mg ⁻¹)	Y向 β_1 / ‰
广州塔 ^[20]	454	钢结构	16.32	4.14	6.54	5.08
上海环球金融中心	492	型钢-混凝土	5.45	3.35	4.95	3.78

4 结论

(1) 上海环球金融中心顶部加速度标准差随平均风速呈幂函数形式增加,指数为2~4。风向角为236.25°~258.75°时,平均风速从8 m·s⁻¹增大到16 m·s⁻¹,X向加速度标准差从0.058 0 mg增大到0.272 1 mg;Y向加速度标准差从0.075 5 mg增大到0.475 8 mg。

(2) 上海环球金融中心一阶自振频率随振幅的

增加而减小。当X向振幅从0.01 mg增大到0.35 mg时,X向一阶自振频率从0.151 2 Hz下降到0.150 1 Hz;当Y向振幅从0.01 mg增大到0.50 mg时,Y向一阶自振频率从0.153 5 Hz下降到0.152 4 Hz。

(3) 上海环球金融中心一阶阻尼比随振幅的增加而增加。当X向振幅从0.03 mg增大到0.35 mg时,X向一阶阻尼比从3.51‰增大到5.27‰;当Y向振幅从0.03 mg增大到0.50 mg时,Y向一阶阻尼比从3.93‰增大到6.25‰。

参考文献:

- [1] JEARY A P. Damping in tall buildings: a mechanism and a predictor[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1986, 14(5):733.
- [2] OHKUMA T, MARUKAWA H, NIIHORI Y, *et al.* Full-scale measurement of wind pressures and response accelerations of a high-rise building[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1991, 38(2/3):185.
- [3] LITTLER J D, ELLIS B R. Full-scale measurements to determine the response of Hume Point to wind loading[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1992, 42(1/2/3):1085.
- [4] TAMURA Y, SUGANUMA S Y. Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1996, 59(2):115.
- [5] CAMPBELL S, KWOK K C S, HITCHCOCK P A, *et al.* Field measurements of natural periods of vibration and structural damping of wind-excited tall residential buildings[J]. *Wind & Structures: An International Journal*, 2007, 10(5):401.
- [6] PIRNIA J D. Full-scale validation of wind-induced response of tall buildings: investigation of amplitude-dependent dynamic properties[C]// *New Horizons and Better Practices*. Reston: ASCE, 2007:1-10.
- [7] KIJIEWSKI-CORREA T L. Full-scale measurements and system identification: a time-frequency perspective [D]. Notre Dame: The University of Notre Dame, 2003.
- [8] KIJIEWSKI-CORREA T, PIRNIA J D. Dynamic behavior of tall buildings under wind: insights from full-scale monitoring[J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2007, 16(16):471.
- [9] LI Q S, FANG J Q, JEARY A P, *et al.* Full scale measurements of wind effects on tall buildings[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1998, 74(2):741.
- [10] LI Q S, XIAO Y Q, WONG C K, *et al.* Field measurements of wind effects on the tallest building in Hong Kong [J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2003, 12(1):67.
- [11] LI Q S, XIAO Y Q, WONG C K, *et al.* Field measurements of typhoon effects on a super tall building [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2):233.
- [12] LI Q S, XIAO Y Q, WONG C K. Full-scale monitoring of typhoon effects on super tall buildings[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2005, 20(5):697.
- [13] LI Q S, FU J Y, XIAO Y Q, *et al.* Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(12):1745.
- [14] LI Q S, ZHI L H, TUAN A Y, *et al.* Dynamic behavior of Taipei 101 Tower: field measurement and numerical analysis [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(1):143.
- [15] FU J Y, LI Q S, WU J R, *et al.* Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind-induced responses of super-tall buildings [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8/9):1332.
- [16] FU J Y, WU J R, XU A, *et al.* Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35(1):120.
- [17] YI J, ZHANG J W, LI Q S. Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2013, 121(5):116.
- [18] HE Y C, LI Q. Dynamic responses of a 492-m-high tall building with active tuned mass damping system during a typhoon[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2014, 21(5):705.
- [19] XU Y L, CHEN S W, ZHANG R C. Modal identification of Di Wang Building under Typhoon York using the Hilbert-Huang transform method[J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2003, 12(1):21.
- [20] GUO Y L, KAREEM A, NI Y Q, *et al.* Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2012, 104/105/106:116.
- [21] AN Y, QUAN Y, GU M. Field measurement of wind characteristics of Typhoon Muifa on the Shanghai World Financial Center [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 2012(1/2/3):34.
- [22] QUAN Y, WANG S, GU M, *et al.* Field measurement of wind speeds and wind-induced responses atop the Shanghai World Financial Center under normal climate conditions [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013:469.
- [23] LU X, ZOU Y, LU W, *et al.* Shaking table model test on Shanghai World Financial Center Tower [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007, 36(4):439.
- [24] HUANG Z, GU M. Envelope random decrement technique for identification of nonlinear damping of tall buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(11):0401601.
- [25] CHEN G, WANG Z. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2012, 28(2):258.
- [26] 汪大绥, 周建龙, 袁兴方. 上海环球金融中心结构设计[J]. *建筑结构*, 2007(5):8.
WANG Dasui, ZHOU Jianlong, YUAN Xingfang. Structural design of Shanghai World Financial Center [J]. *Building Structure*, 2007(5):8.
- [27] ÇELEBI M, PHAN L T, MARSHALL R D. Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-amplitude motions[J]. *Structural Design of Tall Buildings*, 1993, 2(1):1.
- [28] JEARY A P. The description and measurement of nonlinear damping in structures[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1996, 59(2/3):103.