

文章编号:1673-2049(2012)02-0096-06

基于风洞试验的高层建筑风荷载研究及抗风设计

汤 华,王松帆

(广州市设计院,广东 广州 510620)

摘要:基于刚性模型同步测压风洞试验结果,采用覆面积分频域计算方法,对广州松日总部大楼风荷载进行了研究。结果表明:相比顺风向而言,大楼楼层横风向振动的一致性更强;不同风向角下顺风向与横风向基底弯矩分量组成各不相同,其与建筑立面形式相关;大楼振动舒适度满足规范要求。通过进行等效静风荷载和峰值加速度的敏感度分析,为结构优化设计提供了指导。

关键词:高层建筑;风洞试验;等效静风荷载;峰值加速度;敏感度分析

中图分类号:TU973.32

文献标志码:A

Wind Load Research and Wind-resistant Design of High-rise Buildings Based on Wind Tunnel Test

TANG Hua, WANG Song-fan

(Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, Guangdong, China)

Abstract: Based on the results of synchronous dynamic pressure wind tunnel test of rigid model, the wind load of Guangzhou Songri Headquarters Building was researched in frequency domain by the way of facade wind pressure integration. The results show that cross wind vibration of floors keeps more consistently than that of downwind direction; proportions of downwind and cross wind base moment components vary with different wind direction angles and the form of a building facade; the peak accelerations of top floor in this building can meet the comfort requirements in the code. The sensitivity analysis of equivalent static wind load and peak acceleration provide guidance for the structural optimization design.

Key words: high-rise building; wind tunnel test; equivalent static wind load; peak acceleration; sensitivity analysis

0 引言

近 30 年来,各种类型的高层建筑在中国迅速发展,建筑的高度不断增加,建筑外形与功能也越来越复杂,《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)^[1]中有关风荷载的条文已不能满足抗风设计需要,抗风成为结构工程师设计工作的重点和难点。

由于高层建筑高宽比较大,阻尼小,水平方向的抗侧刚度也小,属于典型的风敏感结构。此外,在大

气边界层中,该结构处于复杂的周边环境,加上其独特的建筑外形,其平面为近椭圆形,两短边向内退进,形成凹槽,且立面外侧自上而下布置有突出百叶条,绕流和空气动力作用十分复杂,风荷载成为该结构设计控制荷载之一,需要通过风洞试验来对其风荷载进行分析^[2-3]。

本文中笔者在风洞试验基础上,对结构风荷载进行了分析和研究,并将其应用于结构的抗风设计。等效静风荷载和峰值加速度的敏感度分析为结构优

化设计提供了指导。

1 试验与分析概况

1.1 试验概况

广州松日总部大楼主塔楼高为 188.5 m,顶部伸出女儿墙,建筑顶部标高约为 195 m,其典型平面测点分布见图 1。

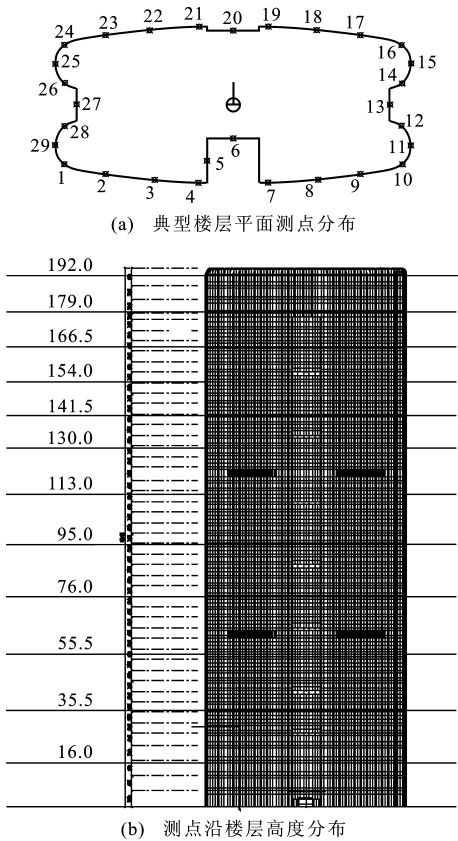


图 1 典型测点层测点分布(单位:m)

Fig. 1 Arrangements of Measuring Points for Typical Story (Unit: m)

风洞试验在广东省建筑科学研究院 CGB-1 大气边界层风洞内进行,采用刚性模型多点同步测压试验技术测量风荷载。模型的几何缩尺比例为 1 : 300,试验模拟 B 类粗糙度地貌。建筑刚性模型见图 2。

在主楼塔上沿高度布置 12 个测点层,风向角间隔取为 10°,共有 36 个风向的试验工况,图 3 为风向角示意。

1.2 覆面积分计算方法

模型试验中各测点风压系数的计算方法按目前各国风工程惯用方法,即按下式计算

$$C_{P_i} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (1)$$

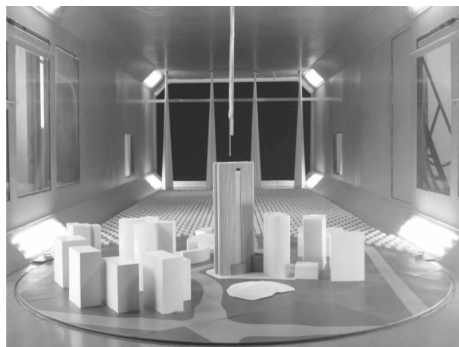


图 2 风洞试验模型

Fig. 2 Model of Wind Tunnel Test

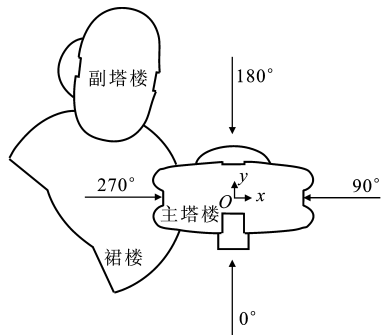


图 3 风向角示意

Fig. 3 Schematic of Wind Direction Angles

式中: C_{P_i} 为建筑物表面某测点*i*的风压系数; P_i 为测点*i*的风压值; P_∞ 为参考点静压力值; P_0 为参考点的总压力值,参考点取为模型顶部高度。

风压符号规定为:压力向下向内为正,向上向外为负,正负号只表示方向。

根据覆面积分计算方法可得到各测点层沿结构主轴方向的水平风力,根据图 1(b)所示的测点层与结构层高度关系,进行空间插值,可计算得到每层楼范围内的水平风力总和。若对其积分到基底,可分别得到基底处沿结构主轴方向的风荷载时程。主体结构风振计算输入荷载采用层风荷载,即作用于该建筑上的风荷载以集中力的形式作用于各结构层上,并且与结构层的自由度相对应,即将沿建筑周向分布的风荷载合成为水平方向的合力 F_x , F_y 和扭矩 M_z ,则结构第 j 测点层的水平力 F_{jx} , F_{jy} 分别为

$$F_{jx} = \sum_{i=1}^m P_{ri}(t) \cos(\alpha_i) L_i \quad (2)$$

$$F_{jy} = \sum_{i=1}^m P_{ri}(t) \sin(\alpha_i) L_i \quad (3)$$

$$M_z = \sum_{i=1}^m P_{ri}(t) \sin(\alpha_i) L_i x_i + \sum_{i=1}^m P_{ri}(t) \cos(\alpha_i) L_i y_i \quad (4)$$

基底弯矩时程 M_x, M_y 分别为

$$M_x = \sum_{j=1}^m F_{jx} Z_j \tag{5}$$

$$M_y = \sum_{j=1}^m F_{jy} Z_j \tag{6}$$

式中： α_i 为测点 i 法线方向与 x 方向的夹角； L_i 为测点 i 控制的水平长度； m 为第 j 测点层总测点数； x_i, y_i 均为测点 i 到结构刚度中心的距离； $P_{ri}(t)$ 为测点 i 换算后层风力时程， $P_{ri}(t) = C_{pr,i}(t) \cdot \mu_H W_0 H_j$ ， $C_{pr,i}(t)$ 为第 j 层测点 i 风压系数， μ_H 为建筑顶部高度转换系数， W_0 为基本风压， H_j 为第 j 测点层控制高度； Z_j 为第 j 测点层相对底部标高。

根据式(2)~(4)可以获得各测点层的水平力 F_{jx}, F_{jy} 与扭矩 M_z ，根据式(5)，(6)可计算得到基底弯矩时程 M_x, M_y 。

结构主轴方向定义如图 3 所示，分析采用基于随机振动理论的频域方法进行结构的风振响应计算。分析时，直接采用根据风洞试验时程数据得到的结构层风荷载谱密度来计算结构风振响应。根据设计要求，结构抗风设计中基底弯矩和等效静风荷载采用 100 年一遇基本风压，为 0.60 kPa，阻尼比为 0.05。结构舒适度计算采用 10 年一遇风压，为 0.30 kPa，阻尼比为 0.02。本文中采用多阶振型组合来计算结构的等效静风荷载，共采用 20 阶振型进行组合计算，其自振频率如表 1 所示。结构第 1 阶振型主要表现为 y 方向的振动，第 2 阶振型主要表现为 x 方向的振动。

表 1 结构前 20 阶自振频率分布

Tab. 1 Distributions of the First Twenty-order Natural Frequencies of Structures

阶次	自振频率/Hz	阶次	自振频率/Hz
1	0.194	11	2.369
2	0.197	12	2.460
3	0.242	13	2.570
4	0.618	14	2.668
5	0.712	15	3.155
6	0.769	16	3.532
7	1.115	17	3.945
8	1.497	18	4.044
9	1.540	19	4.787
10	1.700	20	4.983

2 风效应分析

2.1 风荷载谱特性分析

楼层风荷载时程反映了建筑物某一高度处的流动特性，而基底风荷载时程综合了不同水平位置、垂

直高度上所反映的局部流动特征，是结构整体水平风振效应的总体反映。分别对楼层风荷载时程和基底弯矩时程进行谱特性和相关性分析，以了解结构动态风荷载的相关规律和特征。将风荷载时程除以 $0.5\rho V_h^2 A$ ，可以得到量纲一的 x 方向、 y 方向风荷载力系数时程，其中， ρ 为空气密度， V_h 为顶部参考点风速， A 为结构特征迎风面积。将基底倾覆力矩时程除以 $0.5\rho V_h^2 A H$ ，则可得到量纲一的基底弯矩系数，其中， H 为建筑顶部高度。

这里选择 0° 风向角作为典型风向分别对建筑 $2H/3$ 高度处的楼层风荷载以及结构底部弯矩系数进行谱特性分析，量纲一的频谱分布分别如图 4、5 所示。图 4 中， n 为频率， $S(n)$ 为功率谱密度； s 为均方根， D 为结构特征宽度。从图 4 可以看出， 0° 风向角时，横风向风力系数谱对应一个谱峰，其对应折减频率 nD/V_h ，在 0.1~0.2 Hz 附近，顺风向风力系数谱相对来说较为平坦，无明显谱峰，即振动能量在频域内分布较为平均。与楼层风荷载谱特性类似，顺风向风力谱分布较为平滑而横风向风力谱则出现明显的谱峰值，对应的折减频率 nD/V_h 与楼层风力谱峰值出现位置基本相同(图 4)。值得注意的是，在顺风向上，基底弯矩功率谱曲线较 $2H/3$ 高度处楼层风力谱相对陡峭一些，能量更多地集中在折减频率为 0.1 Hz 位置左右，而在高频部分谱值有明显的衰减。这说明在顺风向上大楼整体风力反映出综合的振动特性，而局部风力表现出的高频振动会被其他楼层予以综合；而横风向上整体风力和局部风力的振动一致性更为接近。

2.2 基底等效倾覆弯矩分析

根据三分量理论，结构等效风荷载可分为平均、背景和共振分量 3 个部分组成，其中平均、背景分量可直接通过作用在建筑表面的水平力 F_{jx}, F_{jy} 计算得到，共振分量与结构的振动特性、阻尼参数相关，用结构振型惯性力表示。下面将着重分析各分量的组成和变化规律，详细计算过程在此不再具体介绍。等效静风荷载通过对各分量按式(7)进行组合得到

$$M=M_A+g\sqrt{M_B^2+M_R^2} \tag{7}$$

式中： M 为基底等效倾覆弯矩； M_A 为平均分量； M_B 为背景分量； M_R 为共振分量； g 为峰值因子。

分别研究基底倾覆弯矩 3 个分量占总力矩的比重(由于背景分量和共振分量按照 SSRC 方法组合，各分量累计比重超过 100%，本文中着重分析变化规律)，如图 6 所示。

从各分量随风向角变化的整体情况来看，各风

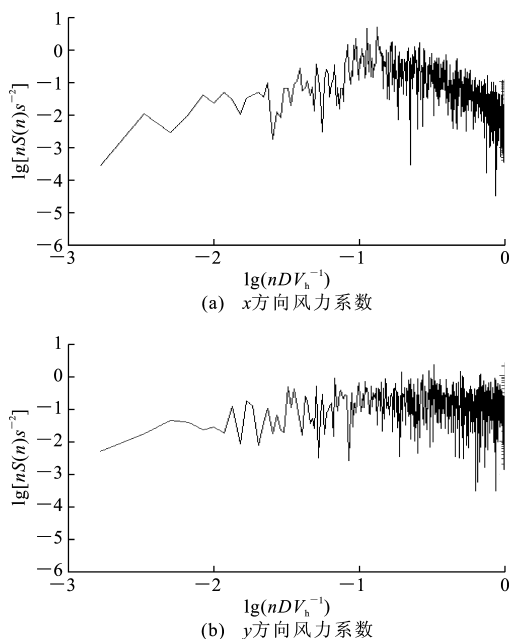


图 4 0° 风向角下 $2H/3$ 高度处风荷载时程功率谱密度
Fig. 4 Power Spectral Densities of Wind Load Time History at $2H/3$ Height Under 0° Wind Direction Angle

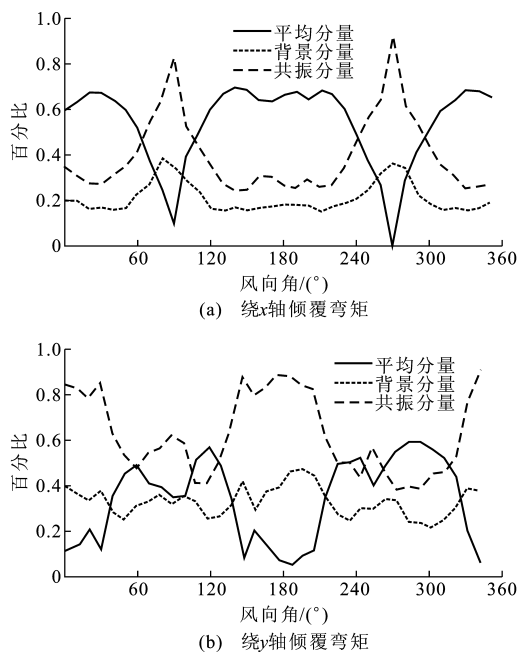


图 6 基底倾覆力矩三分量随风向角的变化
Fig. 6 Variations of Base Overturning Moment Components with Wind Direction Angles

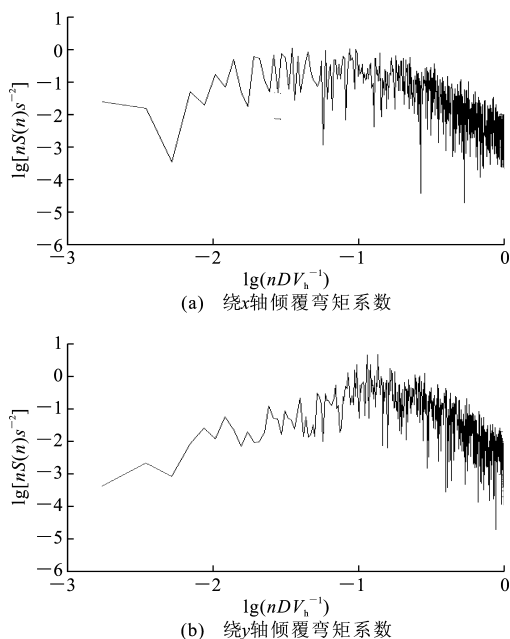


图 5 0° 风向角下基底弯矩时程功率谱密度
Fig. 5 Power Spectral Densities of Base Overturning Moment Time History Under 0° Wind Direction Angle

向角下背景分量在总弯矩所占比重起伏较小,主要在 $20\% \sim 40\%$ 之间,共振分量与背景分量比重随风向角的变化规律一致,与平均分量比重变化规律相反。在顺风向情况下,平均分量所占比重最大,共振分量次之,背景分量所占比重最小。

0° 风向角时,绕 x 轴弯矩 M_x 为顺风向风力,此时基底弯矩平均分量占总弯矩的 60% ,背景分量占

19% ,共振分量则占 35% ,即顺风向平均风力为主导荷载;绕 y 轴弯矩 M_y 为横风向风力,此时基底弯矩平均分量仅占总弯矩的 8% ,背景分量占 37% ,共振分量则占 84% ,即横风向平均风力呈抵消状态,而由于漩涡脱落引起的横风向共振则作为主要荷载。

90° 风向角时, M_y 为顺风向风力,此时基底弯矩平均分量占总弯矩的 32% ,背景分量占 29% ,共振分量则占 61% ; M_x 为横风向风力,此时基底弯矩平均分量仅占总弯矩的 10% ,背景分量占 35% ,共振分量则占 82% 。在此角度下的顺风向风力的各风力组成与 0° 风向角时出现明显差异,此时平均分量与背景分量接近,而共振分量仍作为主导荷载,这主要是由于建筑在短边方向两侧为局部半圆形,当短边方向迎风时,两半圆弧附近流动分离明显,局部甚至会出现较大的负压,使得平均分量比重降低,而共振分量比重增大。 90° 风向角下横风向基底弯矩的各分量组成与 0° 风向角时基本一致。

在分析了结构基底等效倾覆弯矩各分量的组成情况以后,以结构自振频率(或周期)作为变量,分别计算分析了结构基频在 $0.80n_0$, $1.00n_0$, $1.25n_0$ (n_0 为现有结构各方向上的基本自振频率)时不同风向角下基底等效倾覆弯矩,分别如图 7(a), (b) 所示。

从整体上来看,随着结构基频逐渐降低,基底等效倾覆弯矩均有一定幅度的增大,当结构基频由

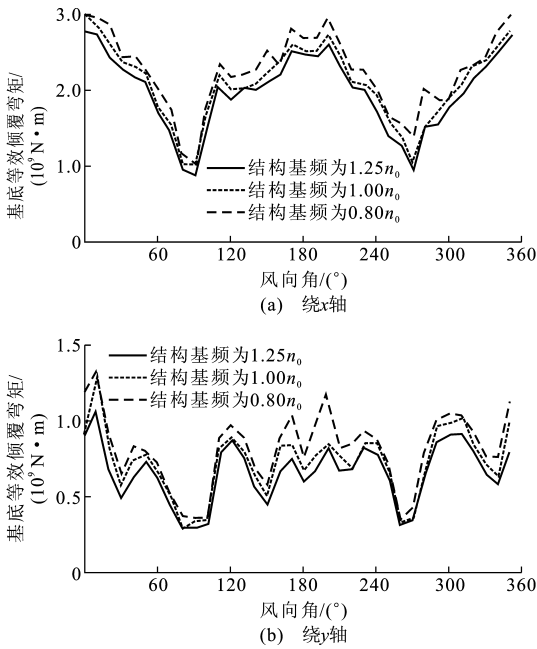


图 7 基底等效倾覆弯矩随风向角的变化
Fig. 7 Variations of Equivalent Base Overturning Moments with Wind Direction Angles

1.00 n_0 增加到 1.25 n_0 时,基底等效倾覆弯矩由大变小,其中 90°风向角时 M_x 减小幅度为 14.4%,对应 M_y 减小幅度为 10.0%;350°风向角时 M_x 减小幅度为 7.1%,对应 M_y 减小幅度为 20.9%。当结构基频由 1.00 n_0 降低至 0.80 n_0 时,基底等效倾覆弯矩由小变大,其中 280°风向角时 M_x 增大幅度为 33.6%,对应 M_y 增大幅度为 19.0%;200°风向角时 M_x 增大幅度为 7.98%,对应 M_y 减小幅度为 36.6%。从上述比较可以看出,不同风向角下随着沿不同结构主轴方向的风荷载振动特性的不同,基底等效倾覆弯矩随结构基频的变化幅度也有所不同,其中横风向等效荷载对频率变化的敏感度更高,顺风向等效荷载的敏感度相对较低。当结构频率调整 25%时,基底等效倾覆弯矩的变化幅度最大达到了 33.6%,因此基于结构基频变化进行敏感度参数分析可作为结构优化或调整的重要依据。

2.3 顶部楼层加速度分析

根据各国相关研究,由于高层建筑结构阻尼比较小,尤其对于不规则的高层建筑,动力风荷载产生的舒适度问题往往成为控制因素^[4-9]。按照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)中的规定,高度超过 150 m 的高层建筑结构应具有良好的使用条件,满足舒适度要求,按现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)中规定的 10 年一遇的风荷载取值计算的顺风向与横风向结构顶点最大加速度

a_{\max} 不应超过规范中表 4.6.6 的限值。必要时,可通过专门风洞试验结果计算确定顺风向与横风向结构顶点最大加速度 a_{\max} ,且不应超过规范中表 4.6.6 的限值。

基于上述覆面积分频域计算方法,得到了 10 年一遇风压下建筑顶部楼层的峰值加速度,如图 8 所示。从图 8 可知,加速度最大值出现在 10°风向角下 y 方向,为 0.096 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,符合 JGJ 3—2010 中关于办公建筑的人体舒适度要求。同时,对计算得到的建筑物顶部 x 方向、 y 方向加速度进行合成处理,参考加拿大资料^[10],当用建筑物顶部 x 方向和 y 方向最大加速度响应叠加为建筑物中心最大加速度时,需要乘以折减系数 0.8,即

$$a=0.8\sqrt{a_x^2+a_y^2} \quad (8)$$

式中: a_x, a_y, a 分别为结构顶层的 x 方向最大加速度、 y 方向最大加速度和最大合加速度。

加速度的最大值出现在 10°风向角时,为 0.109 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,也满足办公建筑的人体舒适度要求。

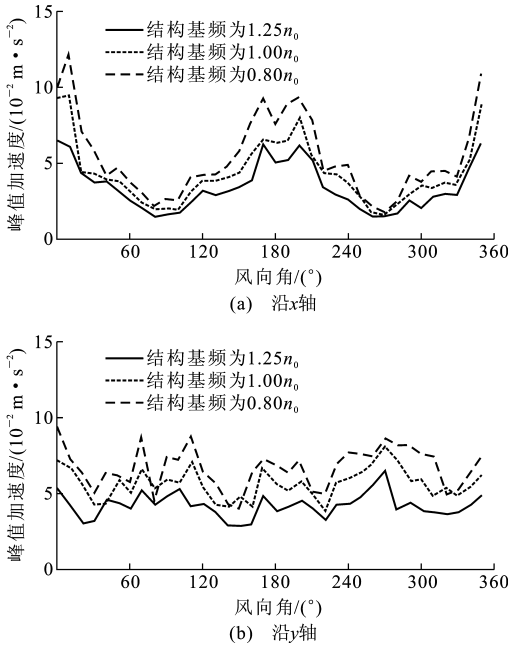


图 8 顶部楼层峰值加速度随风向角的变化
Fig. 8 Variations of Peak Accelerations of Top Floors with Wind Direction Angles

同样以结构自振频率(或周期)作为变量,分别计算分析了结构基频在 0.80 n_0 、1.00 n_0 、1.25 n_0 时不同风向角下结构顶部楼层加速度,分别如图 8(a)和图 8(b)所示。

从整体上来看,随着结构基频逐渐降低,大部分风向角下顶部楼层加速度均有一定幅度的增大。当结构基频由 1.00 n_0 增加到 1.25 n_0 时,顶部楼层加

速度由大变小,其中 280° 风向角时 a_x 减小幅度的 24.5%,对应 a_y 减小幅度的 44.7%; 300° 风向角时 a_x 减小幅度的 38.5%,对应 a_y 减小幅度的 35.8%。当结构基频由 $1.00n_0$ 降低至 $0.80n_0$ 时,基底总弯矩由小变大,其中 20° 风向角时 a_x 增大幅度为 57.7%,对应 a_y 增大幅度为 12.6%; 200° 风向角时 a_x 增大幅度为 37.1%,对应 a_y 减小幅度的 56.5%。从上述比较可以看出,结构顶部楼层加速度随结构基频变化的规律与基底等效倾覆弯矩基本一致,但加速度由于没有平均分量和背景分量的参与,因而其随结构基频变化的敏感度会更大,当设计存在振动舒适度少量超限时,可考虑适当增加结构基频来解决。

3 结 语

(1)从风荷载谱特性来看,顺风向大楼整体风力反映出综合的振动特性,局部风力出现的高频振动被抵消,横风向整体风力和局部风力的振动一致性更为接近。

(2)不同风向角下顺风向与横风向基底弯矩分量组成各不相同,当宽边迎风时,顺风向平均风力占主导,当短边迎风时,顺风向和横风向风力均有共振力占主导。

(3)通过加速度计算分析,对大楼顶部的舒适度进行了评估,得到大楼振动舒适度满足规范要求。

(4)通过进行等效静风荷载和峰值加速度的敏感度分析,为结构优化设计提供了指导。

参考文献:

References:

- [1] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2001, Load Code for Design of Building Structures[S].
- [2] 赵 昕,丁洁民,孙华华,等. 上海中心大厦结构抗风设计[J]. 建筑结构学报,2011,32(7):1-7.
ZHAO Xin, DING Jie-min, SUN Hua-hua, et al. Structural Design of the Shanghai Tower for Wind Loads[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7):1-7.
- [3] 徐天平,李庆祥,易 和,等. 广东科学中心结构风振动态响应分析[J]. 建筑结构,2010,40(8):42-45.
XU Tian-ping, LI Qing-xiang, YI He, et al. Analysis of Wind-induced Dynamic Response for the Structure of Guangdong Science Center[J]. Building Structure,

2010,40(8):42-45.

- [4] 刘进军,肖从真,王翠坤,等. 复杂高层与超高层建筑结构设计要点[J]. 建筑结构,2011,32(11):38-44.
LIU Jin-jun, XIAO Cong-zhen, WANG Cui-kun, et al. Key Points of Structure Design of Complex and Super High-rise Buildings[J]. Building Structure, 2011, 32(11):38-44.
- [5] 唐 意,顾 明,金新阳. 偏心超高层建筑的风振研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):178-182,316.
TANG Yi, GU Ming, JIN Xin-yang. Research on Wind-induced Response of Structurally Asymmetric Tall Buildings[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2):178-182, 316.
- [6] 贾 宁,刘健新,张 颖. 门架式交通标志的风振系数计算[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):46-48.
JIA Ning, LIU Jian-xin, ZHANG Ying. Calculation Method for Wind-vibration Coefficient of Gantry Signs[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2):46-48.
- [7] 刘 鸣,李世翠,刘伯权. 高层建筑抗震设计振型数目选取原则[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):73-76.
LIU Ming, LI Shi-cui, LIU Bo-quan. Criterion of Mode Number Selection in Seismic Design for High-rise Building Structures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4):73-76.
- [8] 汪 权,王建国,张鸣祥. 高层建筑结构随机风速场的数值模拟及风振控制[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(2):32-37.
WANG Quan, WANG Jian-guo, ZHANG Ming-xiang. Numerical Simulation of Stochastic Wind Velocity Field and Wind Vibration Control of High-rise Building Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2):32-37.
- [9] 王松帆,汤 华. 超高层建筑的风振响应及等效静风荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(1):102-107.
WANG Song-fan, TANG Hua. Research on Wind Vibration Response and Equivalent Static Wind Loads of Super High-rise Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1):102-107.
- [10] University of Western Ontario. Preliminary Design Structural Engineering Report Book No. 4[R]. Toronto: University of Western Ontario, 1997.