

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.011

## 典型矩形高层建筑风荷载与风振响应分析

袁玲<sup>1</sup>, 张春梅<sup>1</sup>, 张夏萍<sup>2</sup>, 许伟<sup>2</sup>, 黄启明<sup>2</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省建筑科学研究院, 广东 广州 510500)

**摘要:** 对典型矩形高层建筑进行风洞试验, 根据试验结果计算了各风向角下的等效静风荷载和风振响应, 同时采用《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)计算方法对该建筑正交角度下的风荷载进行计算, 结合风洞试验风荷载与规范计算结果, 研究典型矩形高层建筑等效静风荷载和加速度响应分布规律。结果表明: 结构基底风致响应最不利角度并非完全出现在正交角度, 风洞试验楼层风荷载整体趋势与规范计算结果相同, 数值上存在差异, 宜以风洞试验结果为准, 该结构的顶层加速度响应小于高规限值, 舒适度满足要求。

**关键词:** 矩形高层建筑; 风洞试验; 风荷载; 风振响应

**中图分类号:** TU393.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0069-06

## Analysis of Wind-induced Loads and Responses of Typical Rectangular Tall Building

YUAN Ling<sup>1</sup>, ZHANG Chunmei<sup>1</sup>, ZHANG Xiaping<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, HUANG Qiming<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Academy of Building Research, Guangzhou 510500, China)

**Abstract:** The wind tunnel test of typical rectangular tall building was conducted. The equivalent static wind loads and wind vibration response in different wind angle were calculated based on the results of test. The wind loads of orthogonal angles were calculated by calculation method from "Load Code for the Design of Building Structures" (GB50009-2012). The results of wind tunnel test and load code were compared. The distribution of equivalent static wind loads and acceleration responses of typical rectangular tall building were analyzed. The analysis results show that: the most unfavorable angle of wind base vibration responses are not completely in the orthogonal angles; the overall trend of floor wind loads of wind tunnel test is same as load code, but the specific

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378135)、教育部博士点基金项目(20134410120003)、研究生创新实验项目 (201318)

作者简介: 袁玲, 女, 1988年生, 女, 硕士研究生, 主要从事结构工程研究。

E-mail: yuanling1020@126.com.

通讯作者: 张春梅, 女, 1962年生, 女, 副教授, 主要从事结构工程研究。

E-mail: zhangchunmeik@126.com

numbers are different from load code; should be the wind tunnel test results shall prevail; the top acceleration responses of the structure are less than the standard limit; the comfort levels meet the code requirement.

**Keywords:** Rectangular tall building; Wind tunnel test; Wind load; Wind vibration response

## 0 引言

近年来,随着科技和经济的迅速发展,高层建筑高度越来越高,外形与功能也越来越复杂,结构阻尼比、水平抗侧刚度较小已成为高层建筑的普遍特征,研究与设计人员越来越关注高层建筑的风荷载。结构风工程经过多年的发展,风洞试验、数值模拟、现场实测及规范风荷载计算方法等手段均成为高层建筑风荷载常用的研究方法,同时也取得了一定的成果。文献[1]研究了不同长宽比、高宽比的矩形棱柱体在边界层风洞中典型迎角下的横风力,提出了矩形高层建筑横风力功率谱密度、均方根升力系数和 Strouhal 数的经验公式,并对相干函数作了一定的探讨,建立了完整的横风向动力风荷载解析模型。文献[2]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。文献[3]对结构背景风荷载提出一种新的描述,并将背景风荷载与共振风荷载进行线性组合,建立了相关高层建筑风荷载分析模型,同时探讨高阶振型对高层建筑风振响应的影响。文献[4]对中美日三国荷载规范关于普通高层结构顺风向风荷载标准值的取值原则和计算思路进行了对比,研究了基本风速、风剖面、紊流度等各参数的取值,分析了脉动效应系数影响因素。文献[5]和[6]对广州新电视塔进行风洞试验,并利用随机振动响应分析中的完全二次组合法对结构进行随机风致振动响应分析,包含振型之间交叉项对响应的影响。文献[7]对楔形外形超高层建筑进行同步测压试验,分析不同高度横风向气动荷载功率谱密度、结构基底气动弯矩和风振响应。文献[8]基于风洞试验数据和随机振动理论,建立了考虑二阶振型贡献的矩形高层建筑横风向风振响应简化计算式。

本文以一典型矩形高层建筑为工程背景,对其进行刚性模型多点同步测压试验,根据试验结果,计算结构等效静风荷载和风振响应,同时利用《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[9]</sup>(以下简称规范)计算该典型矩形高层建筑正交角度的风荷载,结合风洞试验与规范计算结果,分析各风向角下结构等效静风荷载和顶层加速度响应的分布规律,

依据《高层建筑混凝土技术规程》(JGJ3-2010)<sup>[10]</sup>的规定,对该典型矩形高层建筑的舒适度进行判断,探讨典型矩形高层建筑风荷载特性,研究成果可为类似高层建筑的抗风设计提供参考。

## 1 风洞试验概况

典型矩形高层建筑总高度约为 188 m,建筑平面尺寸约为 63.6 m×33.5 m,共 45 层,该建筑周围受到多栋高层建筑的干扰。对其进行刚性模型多点测压试验,制作几何缩尺比为 1:250 的刚性测压模型,图 1 为风洞试验模型。

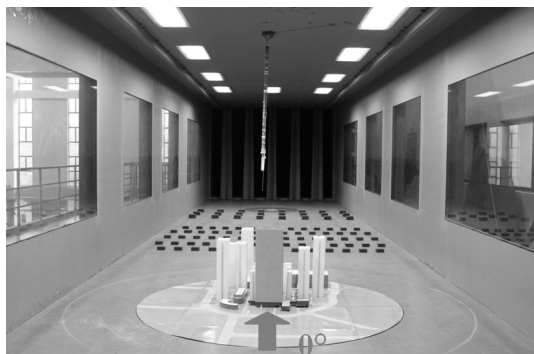


图 1 风洞试验模型

Fig.1 The model of wind tunnel test

试验段内以二元尖塔、挡板及粗糙元模拟出 B 类地貌的风剖面, B 类边界层平均速度和湍流度剖面模拟如图 2 所示,风向角为每间隔 15°一个,共 24 个风向角,风向角示意图如图 3 所示。结构动力特性如表 1 所示。

## 2 试验数据处理方法

在测压试验所得数据基础上,利用覆面积分计算方法和空间插值方法,计算每一楼层范围内的水平风力总和,并将其积分至基底,可分别得到基底处沿结构主轴方向的风荷载时程。主体结构风振计算所需输入的荷载为层风荷载,即作用于该建筑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

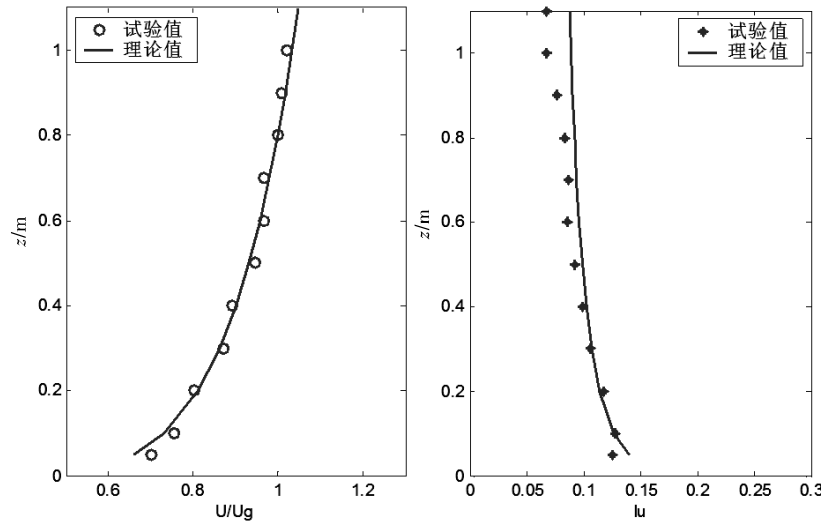


图 2 B 类边界层风剖面 and 湍流度

Fig.2 The wind profile and turbulence of type B terrain roughness

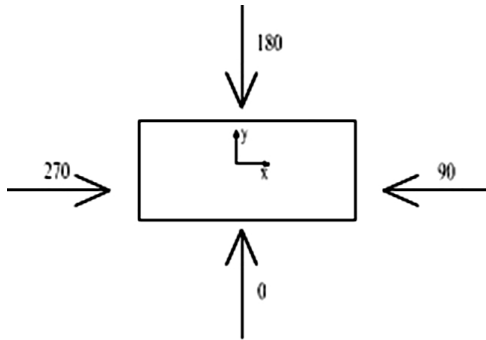


图 3 风向角示意图

Fig.3 The sketch of wind direction of test

表 1 前 9 阶周期和频率

Table 1 Period and frequency of the first 9th modes

Mode	频率/Hz	周期/s
1	0.193	5.1735
2	0.232	4.3095
3	0.258	3.8704
4	0.726	1.3773
5	0.784	1.2751
6	0.794	1.2597
7	1.341	0.7459
8	1.479	0.676
9	1.765	0.5665

水平力  $F_{jx}$ 、 $F_{jy}$  为:

$$F_{jx}=\sum_{n=1}^N(C_{pi}W_r\cos a_iL_i) \tag{1}$$

$$F_{jy}=\sum_{n=1}^N(C_{pi}W_r\sin a_iL_i) \tag{2}$$

式中:  $C_{pi}$  为风压系数,  $W_r$  为风洞试验参考点的风

压,  $a_i$  为测点法线方向与  $x$  方向的夹角  $L_i$  为测点  $i$  控制的水平长度。本文主要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, 即直接根据风洞试验时程数据得到结构荷载谱密度来计算结构风振响应的非拟定常方法。非拟定常方法和拟定常方法相比, 不但可以考虑来流的大气湍流特性, 还能考虑风吹到结构表面而产生的结构特征湍流特性, 且可考虑周围环境对建筑结构的干扰作用。结构等效静风荷载和基底倾覆力矩则采用了惯性力的方法进行计算。

将试验所得风荷载时程进行傅里叶变换, 可得每层风荷载的荷载功率谱密度  $S_{xx}(\omega)$ , 则结构位移响应功率谱为:

$$S_{YY}(\omega)=\{\varphi\}_j^2|H(\omega)|^2S_{xx}(\omega) \tag{3}$$

式中:  $\{\varphi\}_j$  为结构第  $j$  阶振型,  $H(\omega)$  为结构频率响应函数。则结构位移响应的均方根值为:

$$\sigma(z)=\sqrt{\int_0^\infty S_{YY}(\omega)d\omega} \tag{4}$$

结构由脉动风引起的各层等效静风荷载为:

$$F_m(z)=gm(z)\omega_0^2\sigma(z) \tag{5}$$

式中:  $g$  为峰值因子, 则结构各楼层的等效静风荷载为:

$$F(z)=\overline{F}(z)+F_m(z) \tag{6}$$

抗风设计中, 等效静风荷载分析时, 采用 50 年一遇基本风压, 为 0.55 kN/m<sup>2</sup>, 结构阻尼比取 5%, 风振响应分析时, 采用 10 年一遇基本风压, 为 0.35 kN/m<sup>2</sup>, 结构阻尼比取 2%, 试验参考点选取在建筑顶部最高处, 试验风速约 13.1 m/s。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 楼层等效静力风荷载分析

该结构周边建筑较多,在不同的风向角下分布不同,故在不同的风向角下干扰效应程度不同,采用《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[9]</sup>风荷载计算方法对 0°和 90°风向角下结构楼层风荷载进行计算,并将结果与风洞试验结果进行对比。矩形平面结构顺风向风荷载相关计算公式为:

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z W_0 \quad (7)$$

式中:  $W_k$  为顺风向风荷载标准值(kN/m<sup>2</sup>),  $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数,  $\mu_s$  为风荷载体型系数,  $\mu_z$  为风压高度变化系数,  $W_0$  为基本风压(kN/m<sup>2</sup>)。

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z \sqrt{1+R^2} \quad (8)$$

$$R = \sqrt{\frac{\pi}{6\zeta_1} \frac{x_1^2}{(1+x_1)^{4/3}}} \quad (9)$$

矩形平面结构横风向风荷载相关计算公式为:

$$w_{LK} = gw_0 \mu_z C_L \sqrt{1+R_L^2} \quad (10)$$

式中:  $w_{LK}$  为横风向风荷载标准值(kN/m<sup>2</sup>),  $C_L$  为横风向风力系数,  $R_L$  为横风向共振因子,  $\mu_z$  为风压高度变化系数。

$$C_L = (2+2a)C_m \gamma_{CM} \quad (11)$$

$$R_L = K_L \sqrt{\frac{\pi S_{F_L} C_{sm} \gamma_{CM}^2}{4(\zeta_1 + \zeta_{a1})}} \quad (12)$$

横风向广义力功率谱

$$S_{F_L} = \frac{S_p \beta_K (f_{L1}^* / f_p)^{\gamma}}{\left\{ 1 - (f_{L1}^* / f_p)^2 \right\}^2 + \beta_K (f_{L1}^* / f_p)^2} \quad (13)$$

图 4 为 0°风向角下结构 X 向和 Y 向规范楼层风荷载与风洞试验结果对比。图 5 为 90°风向角下结构 X 向和 Y 向规范楼层风荷载与风洞试验结果对比。

由图 4 可以看出,对于 X 向楼层风荷载而言,在结构中下部,规范计算结果大于风洞试验结果,在结构上部,风洞试验结果大于规范计算结果;对于 Y 向楼层风荷载而言,在结构下部,规范计算结果与风洞试验结果相近,在结构上部,风洞试验结果小于规范计算结果。由图 5 可以看出,90°风向角下,对于 X 向楼层风荷载而言,在结构下部,风洞试验楼层风荷载与规范计算结果相近,在结构中上部,风洞试验结果小于规范计算结果;对于 Y 向楼层风荷载而言,风洞试验结果小于规

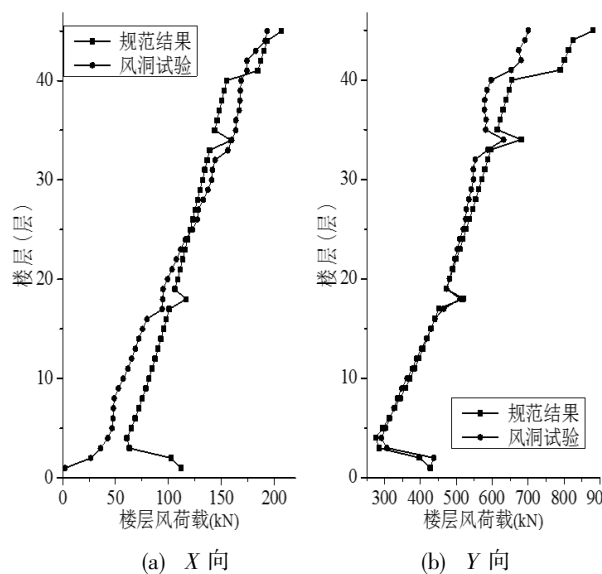


图 4 楼层风荷载(0°)

Fig.4 The wind loads of building storey (0°)

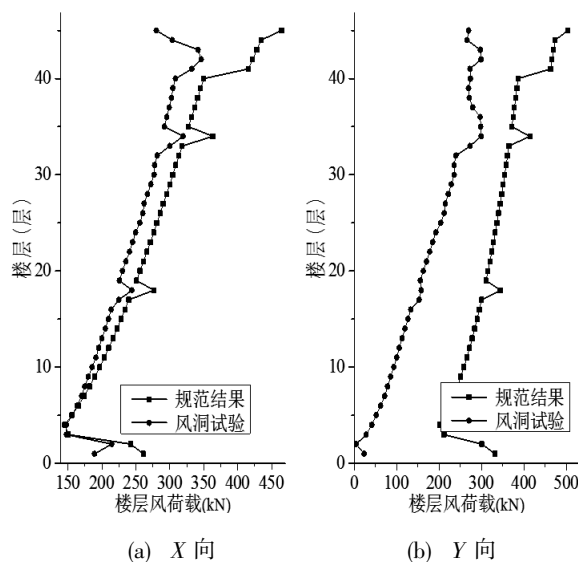


图 5 楼层风荷载(90°)

Fig.5 The wind loads of building storey (90°)

范计算结果。通过上述分析可以看出,规范楼层风荷载与风洞试验楼层风荷载整体趋势一致,均随结构高度的增加而增加。但由于周边建筑的影响,使得风洞试验的楼层风荷载与规范计算结果有不同程度的差异,尤其是风向角为 90°时,周边建筑较多,对该高层建筑存在一定的遮挡作用。对于存在周边建筑干扰的高层建筑,宜采用风洞试验的方法来确定其风荷载,以确保结构的安全性。

#### 3.2 结构基底剪力与弯矩分析

图 6 和图 7 分别为各风向角下结构基底剪力和基底倾覆弯矩。由图 6 和图 7 可以看出,结构 X

向基底剪力最大值出现在  $45^\circ$ ,  $Y$  向基底剪力最大值出现在  $0^\circ$ , 结构  $X$  向基底弯矩最大值出现在  $0^\circ$ , 结构  $Y$  向基底弯矩最大值出现在  $90^\circ$ 。结构各风向角下的基底剪力与基底弯矩并未呈现出严格的对称性, 且基底剪力与基底弯矩的最大值并未严格出现在正交角度, 这主要是周边建筑的干扰所致, 使得相对称的风向角下, 结构的风荷载有所不同, 在正交风向角下, 结构风荷载并非全为最大值。

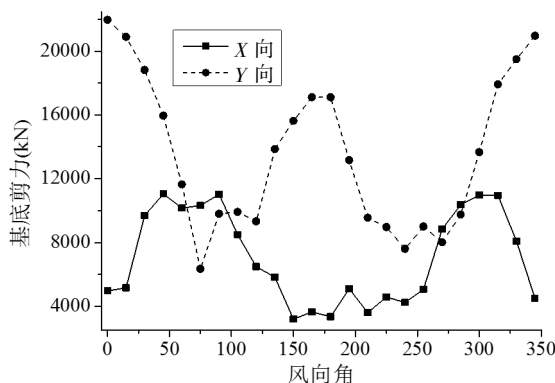


图6 结构基底剪力

Fig.6 Base shear of structure

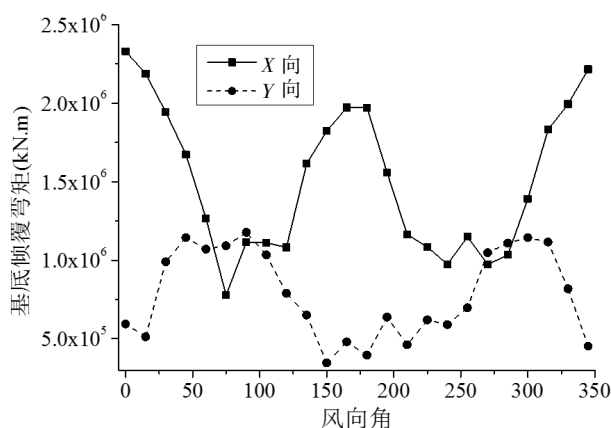


图7 结构基底倾覆弯矩

Fig.7 Base moment of structure

### 3.3 结构舒适度分析

过大的振动加速度会影响高层建筑物使用人群的舒适感, 不能进行日常生活与工作, 故对高层建筑舒适度的严格控制十分必要。《高层建筑混凝土技术规程》(JGJ3-2010)<sup>[10]</sup> (以下简称高规) 根据人体舒适度提出重现期为 10 年的最大(峰值)加速度限值, 对于住宅和公寓建筑而言, 不得超过  $0.15 \text{ m/s}^2$ , 对于办公楼和酒店建筑而言, 不得超过  $0.25 \text{ m/s}^2$ 。图 8 给出了不同风向角下, 结构  $X$  向与  $Y$  向顶层加速度峰值。

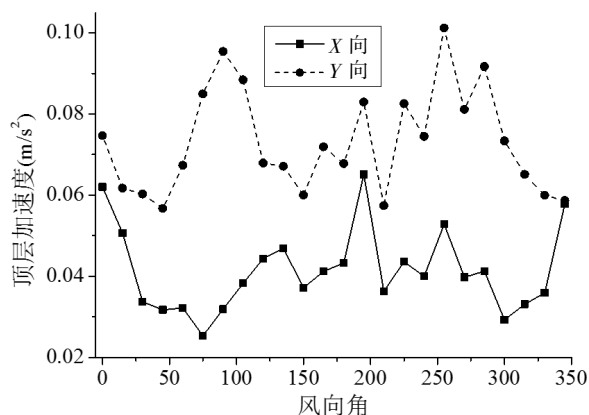


图8 结构顶层加速度

Fig.8 The top acceleration of structure

由图 8 可以看出, 结构  $X$  向加速度最大值出现在  $195^\circ$  风向角下, 为  $0.065 \text{ m/s}^2$ , 结构  $Y$  向加速度最大值出现在  $255^\circ$  风向角下, 为  $0.101 \text{ m/s}^2$ , 结构  $X$  向与  $Y$  向加速度均未超出高规限值, 即结构舒适度满足高规要求。

为了探讨高阶振型对该典型高层建筑加速度响应的影响, 本文分析该典型矩形高层建筑的前三阶振型各占比例, 选取结构  $X$  向和  $Y$  向最大顶层加速度所在角度进行分析, 图 9(a) 和 (b) 分别为  $195^\circ$  风向角  $X$  向和  $255^\circ$  风向角  $Y$  向加速度前三阶振型各占比例。由图 9 可以看出,  $195^\circ$  风向角  $X$

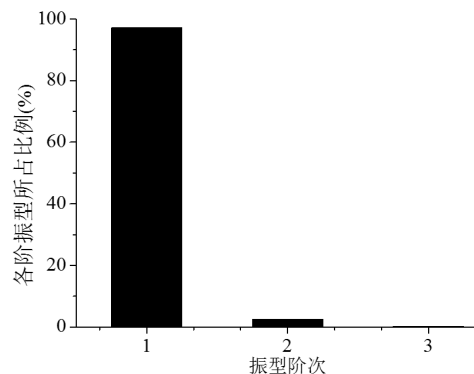
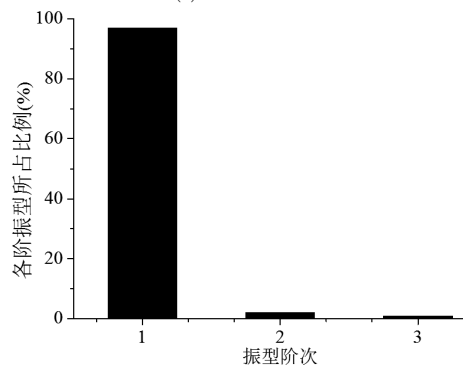
(a)  $195^\circ$ - $X$  向(b)  $255^\circ$ - $Y$  向

图9 前3阶振型加速度比例

Fig.9 Contributions of first three modes of acceleration

向和  $255^\circ$  风向角  $Y$  向一阶加速度所占比例均达 95% 以上, 二阶与三阶振型所占比例均较小, 故针对该结构加速度响应, 仅考虑一阶振型的影响即可满足精度要求。

## 4 结论

本文通过风洞试验与规范风荷载计算方法对典型矩形高层建筑风荷载与风振响应进行分析, 可得出以下结论:

(1) 通过对等效静风荷载分析, 发现该典型矩形高层建筑风荷载最不利角度并不完全为正交角度, 风洞试验楼层风荷载与规范结果整体趋势一致, 数值上存在差异, 宜以风洞试验的风荷载结果为准。

(2) 该典型矩形高层建筑的顶层加速度响应均小于高规限值, 舒适度满足高规要求, 且以一阶振型为主。

### 参考文献:

- [1] 梁枢果, 刘胜春, 张亮亮, 等. 矩形高层建筑横风向动力风荷载解析模型[J]. 空气动力学学报, 2002, 20 (1): 32-38.
- [2] 汤华, 王松帆. 基于风洞试验的高层建筑风荷载研究及抗风设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29 (2): 96-101.
- [3] Xinzhong Chen, Ahsan Kareem. Equivalent Static Wind Loads on Buildings: New Model [J]. Journal of Structural Engineering. ASCE 2004, 130 (10): 1425-1435.
- [4] 张军锋, 葛耀君, 柯世堂, 等. 中美日三国规范高层结构风荷载标准值对比[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2011, 38 (10): 18-25.
- [5] 顾明, 黄鹏, 周垣毅, 等. 广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 I: 风洞试验[J]. 土木工程学报, 2009, 42 (7): 8-13.
- [6] 周垣毅, 顾明, 朱乐乐, 等. 广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 II: 风致响应分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42 (7): 14-19.
- [7] 谢壮宁, 李佳. 强风作用下楔形外形超高层建筑横风效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (11): 118-126.
- [8] 邹垚, 梁枢果, 彭德喜, 等. 考虑二阶振型的矩形高层建筑横风向风振响应简化计算[J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (4): 39-45.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010, 高层建筑混凝土技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.