

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

顾明¹, 黄鹏¹, 周暄毅¹, 朱乐东¹, 潘汉明²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 广州新电视塔建设有限公司, 广州, 510000)

摘要: 广州新电视塔目前是世界第一高电视塔, 总高度约为 610 米。风荷载及其效应将控制结构设计。但由于塔结构形状独特, 无法在风洞中通过测压试验来获得结构上的风力; 又由于结构过于细长, 并且高阶振型对结构风致效应的贡献不可忽略, 因此对全塔(包括天线)结构模型采用高频动态测力天平技术进行风洞试验也是不可行的。为此, 本研究采用新的试验方法——节段模型测力方法——来获得作用在塔的风力分布。本文介绍了试验模型、风洞试验方法、试验数据处理方法以及主要试验结果。试验结果用于结构设计, 同时用于本系列论文第二部分计算全塔的风致响应。本试验方法还可供类似复杂结构抗风研究参考。

关键词: 广州新电视塔, 风洞试验, 节段模型, 高频动态测力天平, 风力分布

Research on Wind Tunnel Force Balance Test and Wind-induced Responses of Guangzhou New TV Tower Structure. I: Wind Tunnel Test

GU Ming¹, HUANG Peng¹, ZHOU Xuan-yi¹, ZHU Le-dong¹, PAN Han-ming²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangzhou New TV Tower Construction Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Guangzhou New TV Tower with a height of about 610 m is presently the tallest TV tower in the world. Wind loading and wind effects on the tower are the key factors for the structural design. Due to its special structural appearance, it is very difficult to measure the wind pressures of the whole tower; and moreover, because high modal responses of the tower could occur under wind excitation, the high-frequency balance technique can not be used as well for this technique can measure only the first mode generalized wind forces. So a new experimental technique is raised and adopted for the wind tunnel test. The whole tower was divided into 19 sections, which were individually tested in TJ-2 Wind Tunnel. This paper introduces the sectional models of the tower, the experimental method and the testing results. The testing results will be adopted for the structural design and for the computation of wind induced responses of the tower and. The present wind tunnel test method could also be used as a reference for wind-resistant design of such complex super-tall structures.

KEYWORDS: New Guangzhou TV Tower; wind tunnel test; sectional model; high-frequency force balance; wind force distribution

1 引言

广州新电视塔目前是世界第一高电视塔, 主塔身高 450 米、天线高约 160 米, 总高度约为 610 米。该电视塔整体造型别致(参见图 1), 塔身为空间钢结构体系, 紧腰筒体的 24 根竖向钢管和水平环状构件、螺旋式斜杆形成外围框架。塔身的各水平界面均为椭圆形, 上下两头大而中间小。塔底椭圆截面的长轴和短轴分别为 80 米和 60 米; 塔顶椭圆截面的长轴和短轴分别为 54 米和 40.5 米, 整体长细比为 7.5。在塔身上, 沿高度方向不等距地布置了 5 个封闭功能区。

该塔结构复杂、细柔及阻尼低, 对风荷载的静力和动力作用都很敏感, 风荷载为其结构设计的控制荷载, 因此有必要通过风洞模型试验来确定作用在其上的风荷载, 并对其风致效应研究。但由于塔结构形状独特, 无法在风洞中通过测压试验来获得结构上的风荷载; 又由于结构过于细长, 并且高阶振型对结构风致效应的贡献不可忽略, 因此对全塔(包括天线)结构模型采用高频动态测力天平技术进行风洞试验也是不可行的。为此, 本研究采用新的试验方法, 将该塔(包括天线)分成 19 个节段, 分别对这些节段的模型进行试验, 获得风力分布, 进一步计算其风致效应^[1]。本文是系列论文的第一部分, 介绍试验模型、试验方法及主要试验结果。系列论文的第

*广州新电视塔建设科研项目、国家自然科学基金创新群体科学基金(50621062)和重大研究计划重点项目(90715040)联合资助

顾明(1957.8), 男, 江苏兴化人, 教授, 长江学者, 主要从事结构抗风研究。EMAIL:minggu@mail.tongji.edu.cn

二部分^[2]介绍广州电视塔的风致响应计算结果。

2 节段刚体模型测力试验概况

2.1 节段刚体模型设计与制作

2.1.1 模型分段

根据结构特征，将电视塔主塔及天线结构分为如表 1 所示的 19 段模型进行试验（见图 1）。考虑到电视塔下部的风力对结构响应的影响较小，把最下面的第一段封闭区(功能区)和第一段非封闭区合为一段；上部风力对结构的响应影响较大，而且最上部封闭区的高度较大，因此把最上部封闭区分为两段；位于标高 170m 和 333m 之间的中部非封闭区高度较大，而且截面尺寸和形状沿高度有较大变化，因此把这一区域分为三个节段；其它封闭区和非封闭区各自分为一段。按天线各段断面形状的不同，将电视塔天线结构分为 8 个节段。

2.1.2 模型制作

如前所述，模型分 19 段进行制作，精细模拟结构外形。为了提高试验结果精度，应使模型有足够的刚度；同时尽量减轻模型质量，使天平-模型系统的固有频率远高于作用荷载的主要频率范围。为此，对电视塔主塔结构，选用质地较轻的泡桐木制作模型外围框架结构；核心筒和封闭功能区外表面用 1mm 厚的薄泡桐木板制成，内填泡沫塑料并部分挖空；上下盖板用航空层板制成。对于天线结构，天线节段 5（即第十六节段）采用内填泡沫塑料外包航空层板的方法制作，其余天线节段均选用薄有机玻璃板及 ABS 板制作。图 2 为节段刚体测力模型照片。

各段模型的重量除第 1 段（全塔最下段）为 1200g，其它各段的重量为 250g~650g。节段模型及试验相关参数见表 1。根据对塔结构响应有贡献的风力频率范围的分析，各段模型+天平系统的自振频率均满足试验要求，而不需要进行修正。

表 1 节段模型及试验相关参数 Table 1 Parameters of sectional model and wind tunnel test

段号	高度范围 (m)	节段描述	几何缩尺比	时间缩尺比 $\lambda_t = t_{k,m} / t_{k,p}$	天平+模型系统 固有频率(Hz)		
					Ux	Uy	Rz
1	6.0 ~ 82.9	塔身封闭区 1+非封闭区 1	1: 150	1: 46.42	45	40	41
2	82.9 ~ 118.5	塔身封闭区 2	1: 150	1: 38.78	45	46	45
3	118.5 ~ 145.5	塔身非封闭区 2	1: 150	1: 36.53	87	87	82
4	145.5 ~ 170.5	塔身封闭区 3	1: 150	1: 35.12	55	73	70
5	170.5 ~ 224.6	塔身非封闭区 3	1: 150	1: 33.44	70	73	82
6	224.6 ~ 278.6	塔身非封闭区 3	1: 150	1: 31.70	71	75	60
7	278.6 ~ 332.7	塔身非封闭区 3	1: 150	1: 30.37	75	80	70
8	332.7 ~ 357.7	塔身封闭区 4	1: 150	1: 29.57	60	84	63
9	357.7 ~ 379.3	塔身非封闭区 4	1: 150	1: 29.15	90	90	88
10	379.3 ~ 417.6	塔身封闭区 5	1: 150	1: 28.63	50	58	90
11	417.6 ~ 460.8	塔身封闭区 5	1: 150	1: 28.63	50	51	87
12	454.0 ~ 480.0	天线节段 1 (渐变段)	1: 80	1: 16.80	82	84	200
13	480.0 ~ 494.5	天线节段 2	1: 50	1: 10.50	72	72	160
14	504.5 ~ 517.7	天线节段 3	1: 45	1: 9.45	83	83	180
15	526.2 ~ 537.2	天线节段 4	1: 40	1: 8.40	75	80	180

16	537.2 ~ 572.2	天线节段 5, 取长为 15 米的中间段	1: 25	1: 5.25	77	80	180
17	572.2 ~ 588.0	天线节段 6, 取长为 6 米的中间段	1: 20	1: 4.20	87	87	168
18	588.0 ~ 600.0	天线节段 7, 取长为 4.8 米的中间段	1: 16	1: 3.36	87	87	168
19	600.0 ~ 610.0	天线节段 8, 取长为 4.5 米的中间段	1: 7.5	1: 1.57	61	61	143

2.1.3 雷诺数效应分析

由于模型的几何尺度和试验风速（见后）均远小于实际值，因此，模型的雷诺数也远小于实际结构^[3]。但由于外框筒是由钢管柱和钢管斜撑及钢管环等组成了一个复杂的空间结构，中央核心筒和封闭功能区均处于外框筒之中，因此整个塔结构处于复杂的高紊流流动之中；天线结构部分节段（2~节段 4，即全塔总第十三节段~第十五节段）由多个钢管柱组成，同时结构上装有天线接受器，这将大大减小雷诺数效应的影响；而天线结构的其余节段因存在尖锐前缘，雷诺数效应可不予考虑。此外，试验在高紊流度风场中进行，风场紊流条件又进一步大大减弱了雷诺数效应。根据以上分析，本试验不再专门模拟雷诺数效应。

2.2 风场模拟

节段刚体模型测力试验要求在模拟的紊流风场中进行。通过对广州新电视塔附近的场地分析并参照上述规范，该电视塔所处地貌属于我建筑荷载规范^[4]中规定的 C 类。

因为整个塔身分成 19 个节段，每个节段高度不大，因而在这每个节段（特别是对塔结构整体风力影响大的塔体上部）的高度范围内平均风速和紊流度的变化均不大，所以本次试验中各节段模型的测力试验在由被动格栅紊流发生器生成的空间均匀紊流场中进行。也即，对每个节段模型，试验平均风速和紊流度均沿高度不变，而平均风速剖面对原型结构风力的影响将在根据气动力系数计算实际结构风力时考虑。由于根据我国《建筑结构荷载规范》^[4]脉动系数公式计算所得紊流度比其他国家规范小很多，同时考虑到广州新电视塔的重要性，据设计单位和专家组的意见，本次试验中紊流度剖面参考日本建筑规范（AIJ）^[5]中紊流度剖面公式 $I_u = 0.1(Z/H_G)^{-\alpha_i - 0.05}$ 来确定，其中，梯度风高度 H_G 和平均风剖面幂函数指数 α_i 按我国《建筑结构荷载规范》取值，分别为 400m 和 0.22。按不同高度范围模拟了 5 种具有不同紊流强度的均匀紊流场（见表 2），试验时，将不同节段模型分别置于不同风场中。此外，相比周边建筑，电视塔高度很大，故近周边环境对作用在电视塔较高部分上的风力（这一部分的风力是最为重要的荷载）的影响很小^[6-9]，所以，试验中没有考虑周边建筑的影响。

表 2 模拟格栅紊流场参数 Table 2 Parameters of turbulence wind simulated in wind tunnel

高度范围 (m)	参考高度 (m)	节段模型编号	紊流度 (%)
0~82.9	45	1	18
82.9~145.5	110	2、3	14
145.5~224.6	180	4、5	12
224.6~358.0	290	6、7、8	11
358.0~610.0	410	9~19	10

2.3 试验概况

节段刚体模型测力试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-2 边界层风洞中进行。试验采用五分量高频天平来测量作用在每一段模型上的气动力。试验时,对主塔塔体,除了被测模型段本身安装在天平上,还在测试段的上下两侧安装一定高度的补偿模型段,模拟和测试段相连的上部和下部节段结构(参见图 2),使其尽可能地模拟原型被测结构节段的三维流动。补偿模型段用有机玻璃另外制作。而对天线结构,由于其分段等截面,因而天线各段的流动主要是二维流动,所以在每个测试节段模型的上下仅安装二元端板(不和被测模型相接触,并保持较小的缝隙),而不设置补偿模型。试验模型及其安装见图 2。

主塔结构各节段模型测力试验的风速均为 10m/s,天线结构各节段模型测力试验的风速均为 11m/s,既满足信噪比要求,同时使得天平-模型系统的可用频率范围尽量大。

试验风向范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,间隔 11.25° ,共 32 个风向角,模型方位及风向角见图 3。对应于实际节段结构的采样频率从 4.3~31.7Hz,数倍乃至数十倍高于激励结构振动的频率;对应于各实际节段结构的试验时间从 15 分钟至一小时。

3. 试验结果及分析

测力天平的坐标系统中, X 轴指向正东, Y 轴指向正北, Rz 根据右手法则确定,坐标原点为五分量高频天平顶面(承载面)的中心(参见图 3)。设通过节段刚体模型测力试验获得沿 X 方向和 Y 方向的总水平风力和绕 Z 轴的总扭转风力的时程为 $F_{Xm}(t_m)$ 、 $F_{Ym}(t_m)$ 、 $M_{Zm}(t_m)$ (这里下标 m 代表模型,下同),则可以得到各节段的空间平均无量纲风力系数的时程为:

$$\mu_{F_{X,Y}}(t_m) = F_{(X,Y)m}(t_m) / 0.5\rho U_m^2 H_m D_m, \quad \mu_{M_Z}(t_m) = M_{Zm}(t_m) / 0.5\rho U_m^2 H_m D_m^2 \quad (1\sim3)$$

这里, U_m 为试验风速, ρ 为空气密度; t_m 为模型的时间; H_m 和 D_m 分别为该节段模型的高度和特征尺寸,为了方便起见,对主塔全部 11 个节段模型, D_m 统一取为核心筒的长轴尺寸,即 0.12m,相当于原型的 18m;对于天线的 8 个节段模型(第十二~十九节段),原型的 D_m 依次为 8.25m、6.5m、4.5m、3.5m、2.5m、1.5m、1.2m 及 0.75m。

根据时间缩尺比 λ_t ($\lambda_t = \lambda_L / \lambda_V$,几何缩尺比与风速比之比)可得原型的时间 $\{t_k\} = \{t_{k,m}\} / \lambda_t$ (下标 k 表示第 k 个时刻)。由于在测力试验中,对不同节段模型采用了相同的试验风速,而在实际大气边界层风场中,各节段模型高度不同,对应的实际风速也不同,因此它们的风速比 λ_V 和时间缩尺比 λ_t 也各不相同(如表 1 所示)。这样,考虑 λ_t ,可得到电视塔原型的气动力系数时程: $\mu_{F_X}(t)$ 、 $\mu_{F_Y}(t)$ 和 $\mu_{M_Z}(t)$ 。进一步,根据统计方法可以获得气动力系数均值 ($\mu_{F_X,\text{mean}}$ 、 $\mu_{F_Y,\text{mean}}$ 、 $\mu_{M_Z,\text{mean}}$)、根方差值 ($\mu_{F_X,\text{rms}}$ 、 $\mu_{F_Y,\text{rms}}$ 、 $\mu_{M_Z,\text{rms}}$),进一步可按照下列各式计算极大值 ($\mu_{F_X,\text{max}}$ 、 $\mu_{F_Y,\text{max}}$ 、 $\mu_{M_Z,\text{max}}$) 和极小值 ($\mu_{F_X,\text{min}}$ 、 $\mu_{F_Y,\text{min}}$ 、 $\mu_{M_Z,\text{min}}$):

$$\mu_{F_{X,Y},\text{max}} = \mu_{F_{X,Y},\text{mean}} + g\mu_{F_{X,Y},\text{rms}}, \quad \mu_{F_{X,Y},\text{min}} = \mu_{F_{X,Y},\text{mean}} - g\mu_{F_{X,Y},\text{rms}} \quad (4\sim6)$$

$$\mu_{M_Z,\text{max}} = \mu_{M_Z,\text{mean}} + g\mu_{M_Z,\text{rms}}, \quad \mu_{M_Z,\text{min}} = \mu_{M_Z,\text{mean}} - g\mu_{M_Z,\text{rms}} \quad (7\sim9)$$

其中, g 为峰值因子,对于气动力系数,本文取 $g = 3.5$ 。

图 4 为典型塔段的力系数均值和极值随风速的变化曲线。结果表明,对于以体轴定义的 X 和 Y 坐标系统,各节段结构的风力系数(平均风力系数和极值风力系数)均呈准周期性变化规律。0 度和 180 度风向时, X 坐标方向为横风向,由于结构的近似对称性, X 方向的平均风力系数基本为 0;而 90 度和 270 度风向时, X 方向的平均风力系数绝对值最大。与此相反,0 度和

180 度风向时, Y 坐标方向为顺风向, 所以 Y 方向的平均风力系数绝对值最大; 而 90 度和 270 度风向时, Y 方向的平均风力系数在基本为 0。此外, 力系数值较大 (比如, 对第一节段来说, 平均力系数的最大值超高 3), 这是由于定义力系数时, 节段结构的特征尺寸 D_m 仅取核心筒的长轴尺寸。总体来说, 扭矩系数值很小。另外, 第 11 节段模型 (即主塔体顶部节段) 形状复杂, 扭矩系数随风向的变化规律和其它节段不同。

在获得了气动力系数后, 就可以确定作用在实际电视塔上的风力。设 $F_{X_j, Y_j}(t)$ 和 $M_{Z_j}(t)$ 分别表示作用在电视塔原型的某段 (该段中面离地高度为 Z_j 、厚度为 H_j) 上核心筒中心处沿两正交水平轴 X、Y 方向的水平风力和绕竖轴 Z 的扭转风力的时程, 则

$$F_{X_j, Y_j}(t) = \frac{1}{2} \rho U_{Z_j}^2 H_j D \mu_{F_{X_j}, F_{Y_j}}(t), \quad M_{Z_j}(t) = \frac{1}{2} \rho U_{Z_j}^2 H_j D^2 \mu_{M_z}(t) \quad (10\sim 13)$$

其中, D 为对应于式 (1~3) 中 D_m 的电视塔原型的尺寸; U_{Z_j} 为实际风场中高度 Z_j 处的风速:

$$U_{Z_j} = U_G (Z_j / H_G)^\alpha \quad (14)$$

其中, H_G 和 α 分别为梯度风高度和平均风速剖面的幂函数指数。

类似于风力系数, 可得风力平均值 ($F_{X, \text{mean}}$ 、 $F_{Y, \text{mean}}$ 、 $M_{Z, \text{mean}}$)、根方差值 ($F_{X, \text{rms}}$ 、 $F_{Y, \text{rms}}$ 、 $M_{Z, \text{rms}}$)、极大风力 ($F_{X, \text{max}}$ 、 $F_{Y, \text{max}}$ 、 $M_{Z, \text{max}}$) 和极小风力 ($F_{X, \text{min}}$ 、 $F_{Y, \text{min}}$ 、 $M_{Z, \text{min}}$)。

图 5 给出了典型风向时, 100 年重现期时沿塔高度分布的平均风力、极大风力、极小风力。图中, 圆点表示平均风力, 围绕平均风力左右的另外两条折线表示极大和极小风力。由图可见: 和图 4 结果类似, 0 度风向时, X 方向的平均风力系数基本为 0; 而 90 度风向时, X 方向的平均风力系数绝对值最大; 塔体上有多个封闭功能区, 由于迎风面积大, 封闭区的风力明显大于非封闭区的风力; 由于塔体“轻转柳腰”的建筑外形, 造成横风向风力和扭转风力 (虽然较小) 在不同的节段上出现正负交替的情况。试验获得的风力可用于计算塔结构的风致响应。

4 结 语

由于广州新电视塔结构形状独特和高阶振型将参与振动, 无法在风洞中通过测压技术来获得结构上的风力。为此, 本文采用节段模型测力这一新的试验方法方法来获得作用在塔上的风力分布。将电视塔主塔及天线结构分为 19 段模型; 按结构不同高度范围模拟了 5 种具有不同紊流强度的均匀紊流场, 将不同节段模型分别置于不同风场中进行试验。试验结果表明, 0 度风向时, X 方向 (顺风向) 的平均风力系数基本为 0; 而 90 度风向时, X 方向的平均风力系数绝对值最大; 塔体上有多个封闭功能区, 由于迎风面积大, 封闭区的风力明显大于非封闭区的风力。试验获得的风力可用于计算塔结构的风致响应。此外, 本试验方法可供类似复杂结构抗风研究参考。

本文成果的知识产权归广州新电视塔建设有限公司所有。

参考文献

- [1] 顾明, 周晖毅, 黄鹏, 朱乐东, 广州新电视塔第二阶段风洞试验研究 (二期项目), 研究报告 SLDRCE WT200617, 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海, 2006 年 8 月。
- [2] 周晖毅, 顾明, 朱乐东, 黄鹏, 潘汉明, 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. (本系列论文第二部分)
- [3] E. Simiu 和 R. H. Scanlan 著, 刘尚培、项海帆、谢霖明译, 《风工程导论---风对结构作用》, 同济大学出版社, 1992 年。
- [4] 中华人民共和国建设部, 《建筑结构荷载规范—GB 50009—2001》(2006 年版), 中国建筑工业出版社, 北京, 2006。
- [5] Architectural Institute of Japan, AIJ Recommendations for Loads on Building, 2004. 日本建筑协会 (AIJ), 房屋荷载建议, 1995。
- [6] 金茂大厦干扰效应顾明, 周印, 张锋, 项海帆, 江欢成, 金茂大厦风致振动的实验研究, 振动工程学报, 13(2), 2000:188-194
- [7] M. Gu, Z.N.Xie, M. Gu and Z. N. Xie, Along-wind dynamic interference effects of tall buildings, Advances in Structural Eng. —An International Journal, 8(6), 2005: 623-636

- [8] N.Z.Xie, M.Gu, Z. N. Xie, M. Gu, Mean Interference effects among Tall Buildings, Engineering Structures, 26, 2004:1173-1183
- [9] N. Xie, M. Gu, Xie & M. Gu, Simplified evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95(1), 2007: 31-52

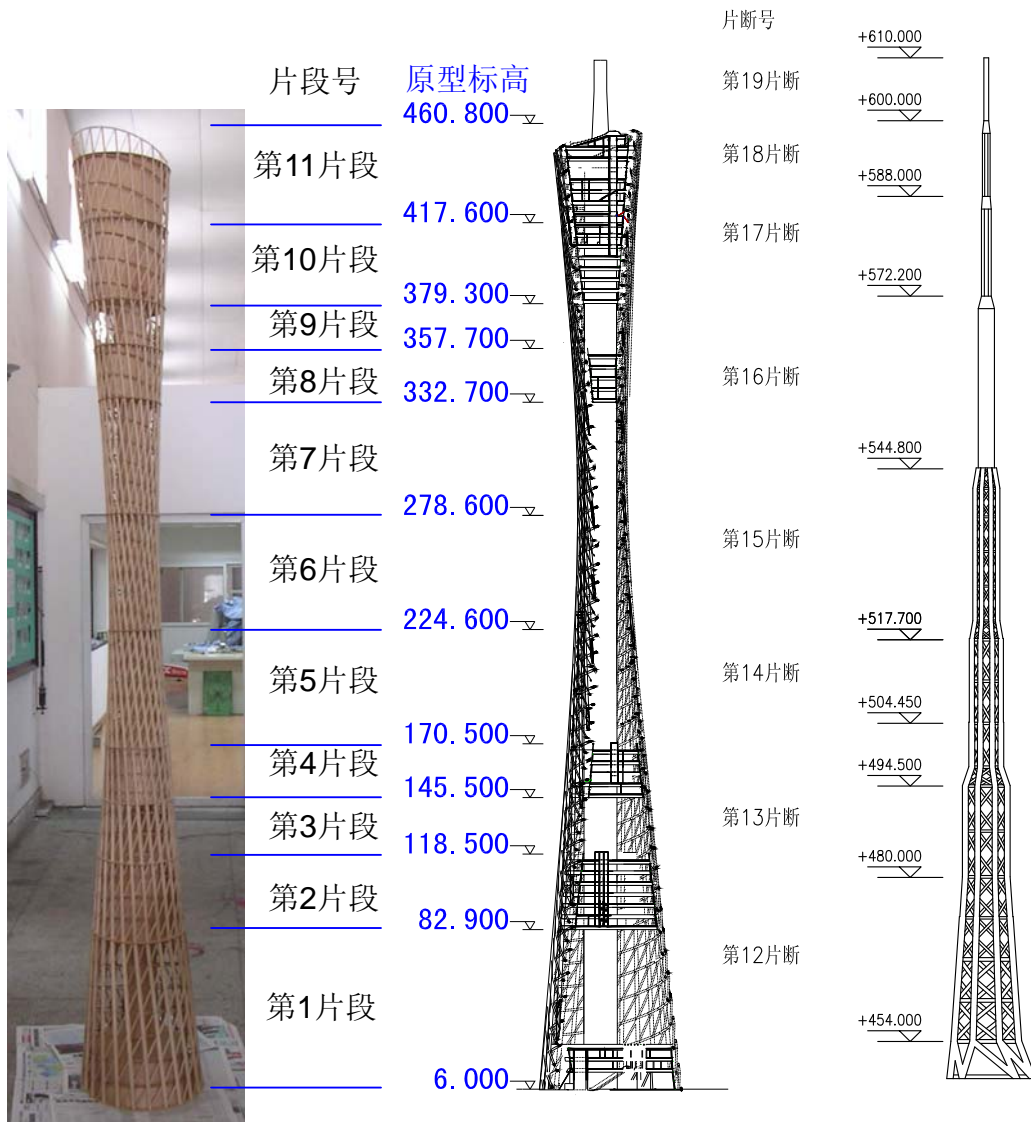


图1 (续) 塔身及天线测力模型分段示意图

Fig.1 Sectional models of tower



图2 风洞中节段刚体测力模型照片

Fig.2 Photographs of sectionl model of tower in wind tunnel

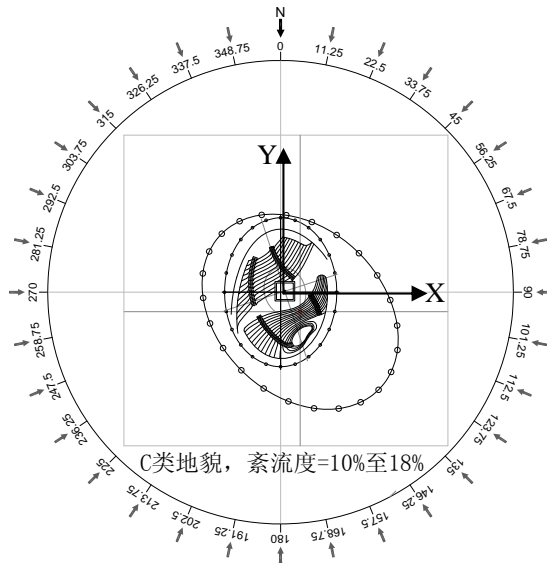
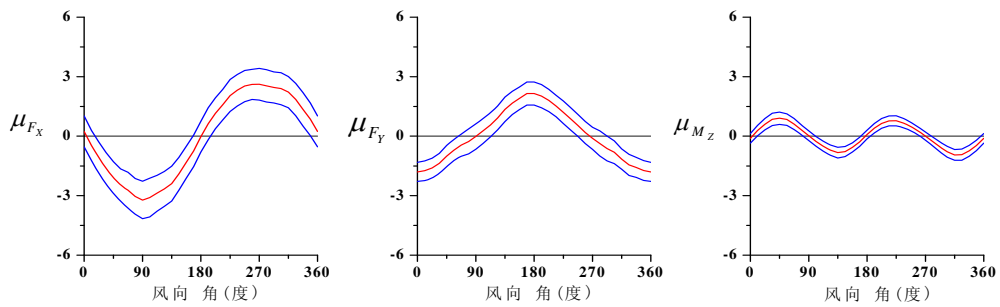
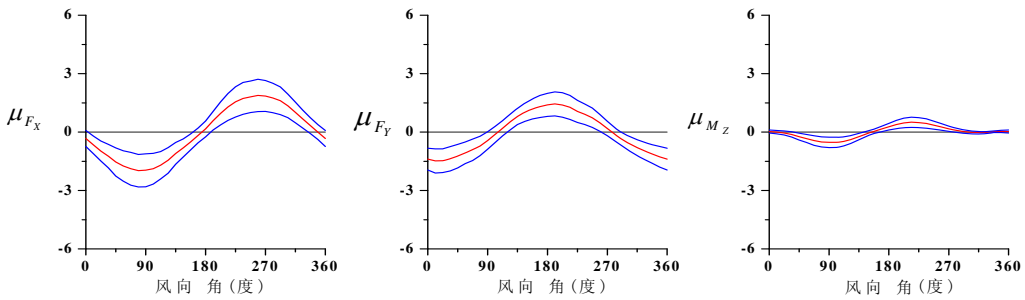
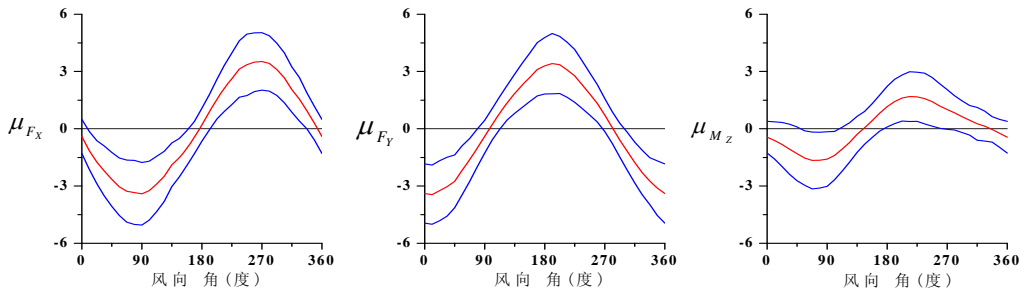
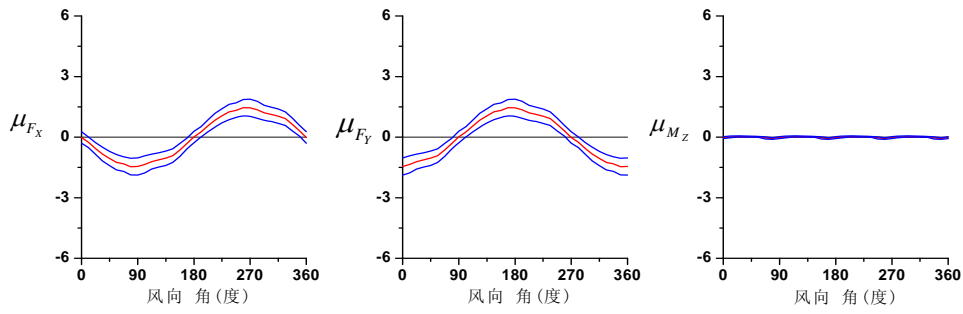


图3 模型方位及风向角定义

Fig. 3 Definitions of coordinate system and wind direction

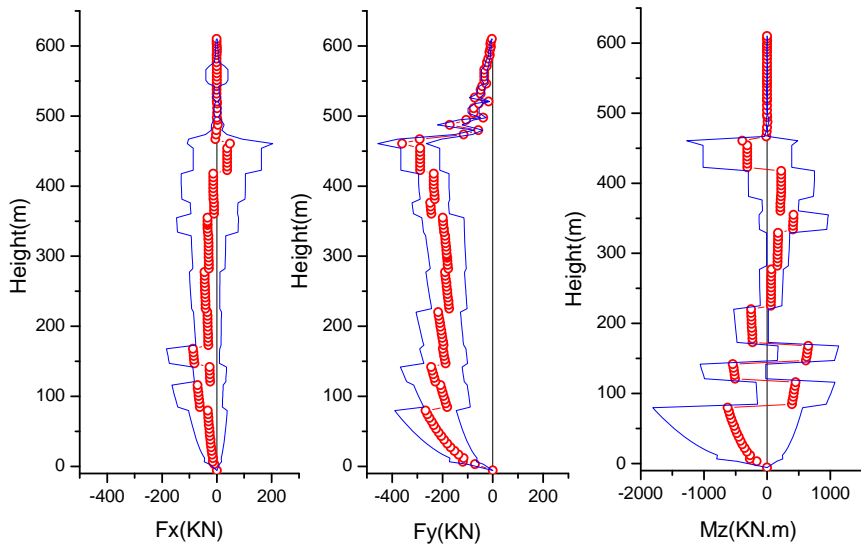




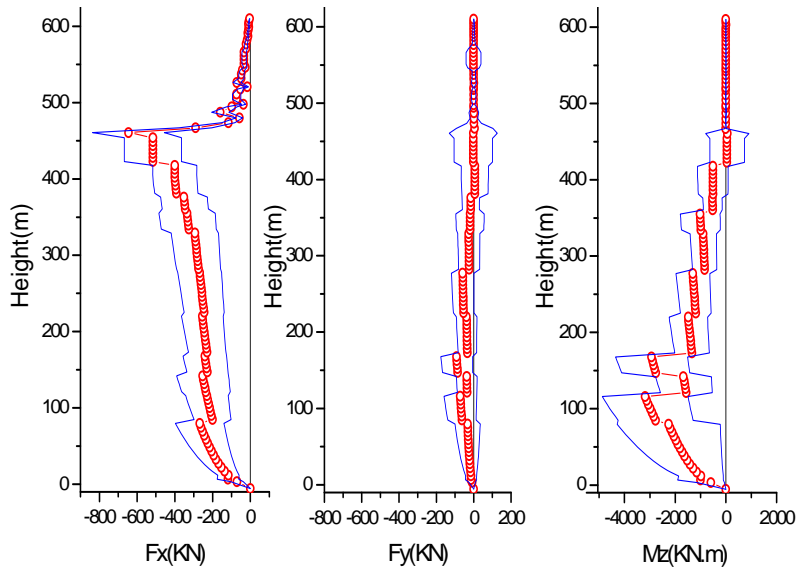
节段 15

图 4 各节段模型平均、极大和极小气动系数随风向角变化

Fig.4 Variations of mean, maximum and minimum wind force coefficients with wind direction



(0.00 度风向角, 100 年重现期)



(90.00 度风向角, 100 年重现期)

图 5 平均风力、极大风力和极小风力沿塔高度分布

Fig. 5 Distributions of mean, maximum and minimum wind forces along the tower