

风敏感性高耸钢结构电视塔的风致效应研究

何天森¹, 周志勇², 巢 斯¹

¹同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海

²同济大学, 上海

收稿日期: 2022年3月25日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月25日

摘 要

高耸的钢结构电视塔, 具有结构高度较高、结构刚度相对较小的特点, 对于风荷载高度敏感。本文对钢结构电视塔采用缩尺比例的刚性模型, 进行刚体模型群体建筑测压风洞试验, 测定360度风向角下的电视塔模型表面的风压值, 从而可以正确地计算出电视塔实物表面的平均风压值、脉动风压值、风荷载体型系数, 确定最不利风向角以及沿电视塔高度变化的风振系数。根据试验进行结构风振响应分析, 将刚体模型测压风洞试验获得的各测点脉动压力时程作用于结构动力分析有限元模型上对结构进行频域分析, 确定其重要部位的风振位移和加速度响应以及各层的等效风荷载, 为设计提供必要的和可靠的依据。

关键词

电视塔, 高耸, 钢结构, 风敏感性, 风致效应, 风洞试验

Study on Wind-Induced Effect of Wind Sensitive High-Rise Steel Structure TV Tower

Tiansen He¹, Zhiyong Zhou², Si Chao¹

¹Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai

²Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 25th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 25th, 2022

Abstract

The high-rise steel structure TV tower has the characteristics of high structural height and relatively small structural stiffness and is highly sensitive to wind load. In this paper, the steel structure TV tower adopts the rigid model with reduced scale, carries out the pressure measurement

wind tunnel test of rigid model group buildings, and measures the wind pressure value on the surface of the TV tower Model under 360° wind angle, so that the average wind pressure value, fluctuating wind pressure value and wind load shape coefficient on the physical surface of the TV tower can be calculated correctly to determine the most unfavorable wind direction angle and the wind vibration coefficient varying along with the height of the TV tower. The wind-induced vibration response of the structure is analyzed according to the test. The fluctuating pressure-time history of each measuring point obtained from the wind tunnel test of the rigid body model is applied to the finite element model of structural dynamic analysis. The frequency-domain analysis of the structure is carried out to determine the wind-induced vibration displacement and acceleration response of its important parts and the equivalent wind load of each floor, so as to provide a necessary and reliable basis for the design.

Keywords

TV Tower, High-Rise, Steel Structure, Wind Sensitivity, Wind-Induced Effect, Wind Tunnel Test

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高耸钢结构电视塔具有造型独特、结构复杂、质量和刚度分布不均匀的特点,同时,由于其高度较高、结构刚度相对较小,根据相关规范[1] [2] [3],其设计验算指标具有一定特殊性。对于风荷载具有高度敏感,而且非线性特征明显[4] [5],因此,风致效应的研究对于高耸钢结构电视塔具有关键的意义。任志刚等[6]采用数值模拟的方式,对高耸钢结构的风致效应进行模拟,禹慧等[7]采用时程分析的方法模拟三维风振响应。

2. 工程概况

某高耸钢结构电视发射塔项目,位于上海市金山区,基础均采用桩基础,发射塔主塔结构顶部高度为 140 m,发射天线的顶部高度为 188 m。

该电视塔采用了较为新颖的空间桁架钢结构体系。采用由七个空间八面体上下“叠加”而成的空间桁架,每个八面体上下面均为等边三角形,各等边三角形的中心在一条竖向轴线上,每隔 20 m 一道,但上下旋转 180°布置,八面体的侧面为六个完全相同的等腰三角形。“内筒”由 12 根钢柱组成的圆柱体构成,并和“外筒”每隔 20 m 采用横梁连接在一起,在内筒内布置楼梯和电梯,形成竖向通道。结构侧向力主要有外围空间桁架承担,竖向力由空间桁架和内层钢柱共同承担,天线由内筒延伸形成,确保了结构在此衔接处受力的可靠性和均匀性。

本项目中,按照通常高耸钢结构的设计,考虑到了风荷载为高耸结构的主要工况,进行了风洞试验,需要按规范计算和试验进行包络计算设计[6] [7]。

3. 验概况

3.1. 试验风洞

考虑高耸结构的风工程特性[8] [9],风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行。该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,整个回流系统水平布置,试验段尺寸为 3 m 宽、2.5 m 高、15 m 长。试验风速范围从 0.5 m/s~68 m/s,流场性能良好,试验区流场的速度不均

匀性小于 1%、湍流度小于 0.46%、平均气流偏角小于 0.5 度。

3.2. 试验模型

钢结构电视塔建筑风洞模型为刚体模型(图 1)，主要考虑了外形相似关系。为了保证模型表面风压测试的精度，本次试验选用了较大的模型比例，缩尺比为 1/100。用有机玻璃材料制成，具有足够的强度和刚度，在 12 m/s 的试验风速下不发生变形，并且不会出现明显的振动现象。试验时将模型放置在直径为 2.8 m 的转盘中心，通过旋转转盘模拟不同风向。



Figure 1. Wind tunnel pressure measurement model and turntable
图 1. 风洞测压模型和转盘

本次试验对电视塔建筑进行测压。电视塔建筑风压试验模型表面共布置了 144 个测点。

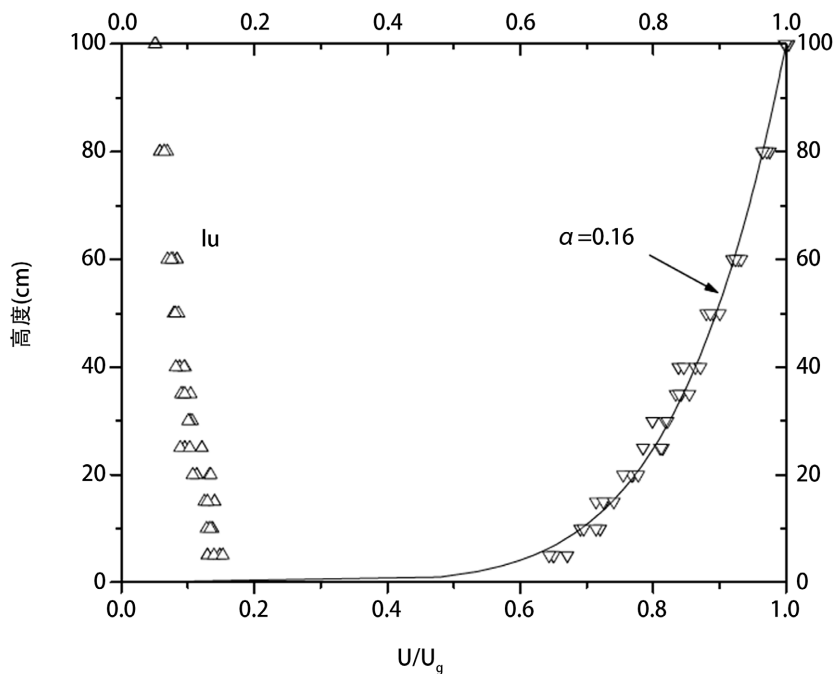


Figure 2. Average wind speed and turbulence profile of wind field simulating class B atmospheric boundary layer

图 2. 模拟 B 类大气边界层风场的平均风速和紊流度剖面

考虑到电视塔建筑地处上海市金山区,电视塔建筑模型风洞试验时采用标准的 B 类地貌风场,采用尖坡加粗糙元的大气边界层风洞模拟方法,图 2 给出了 B 类风场的风速剖面和紊流度剖面。测压试验在 0 度~360 度范围内的不同风向角下进行,风向角间隔 15 度,共 24 个风向角。

4. 结构设计的风洞试验结果分析

4.1. 不同风向角下各测点的平均风压系数

在空气动力学中,物体表面的风压通常用无量纲风压系数 $C_{P_{i,r}}$ 表示为

$$C_{P_{i,r}} = \frac{P_i - P_{rs}}{P_{r0} - P_{rs}} = \frac{P_i - P_{rs}}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (1)$$

其中, P_i 为作用在测点 i 处的风压, P_{r0} 和 P_{rs} 分别是试验时参考高度处的总压和静压, U_r 为参考点处的平均风速, ρ 为空气密度, $C_{P_{i,r}}$ 为以参考点动压 ($\frac{1}{2} \rho U_r^2$) 为参考风压的测点 i 处的风压系数。

内、外(或上、下)表面同步测量的各对测压点的净风压系数可由下式给出:

$$C_{P_{i,r}} = \frac{P_{iu} - P_{id}}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (2)$$

其中 P_{iu} 为作用在测点 i 处的外(或上)表面风压, P_{id} 为作用在测点 i 处的内(或下)表面风压。

由于参考点高度不同于梯度风高度,因此需按下式(3)把所有直接测得的风压系数换算成以与地貌无关的梯度风风压为参考风压的风压系数 C_p , 即

$$C_p = (Z_r/H_G)^{2\alpha} C_{P_{i,r}} \quad (3)$$

对于本次测压试验,在 B 类地貌下 $H_G = 350$ m、 $\alpha = 0.15$, 从而有

$$C_p = (50/350)^{0.15} C_{P_{i,r}} = 0.7468 C_{P_{i,r}} \quad (4)$$

这里, C_p 可以是平均风压系数,也可以是极大或极小风压系数。

4.2. 不同风向角下各测点的局部体型系数和层体型系数

在某些结构分析标准软件中,必须输入《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)定义的体型系数。为了适应这一需要,这里根据前述得到的平均风压系数,可以确定各个测点的体型系数(以下称为局部体型系数)。

《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)中规定的作用在建筑物表面上高度 Z 处的风荷载标准值的计算公式为:

$$\omega = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_{0,R} \quad (5)$$

式中 $\omega_{0,R}$ 为高度 Z 处的风振系数(本试验未涉及); μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; $\omega_{0,R}$ 为基于 B 类风场的 R 年重现期,10 米高度处、10 分钟平均的基本风压,随重现期的不同取不同的值。

根据本试验测得的不同高度 Z 各测点的平均风压系数 $C_{P_{mean,i}}$, 可容易地换算得到各测点相应的局部体型系数 μ_{si} (应用于 B 类地貌), 即:

$$\mu_{si} = C_{P_{mean,i}} \times \left(\frac{350}{z} \right)^{0.30} \quad (6)$$

对于大量的试验数据(各测点的局部体型系数或风压系数)的表达形式复杂,不便于分析最不利风向及其对应的风荷载。为此,将高耸建筑表面沿高度划分为若干区段,给出每个区段 X 方向和 Y 方向上的层体型系数,即:

$$\mu_{s,bX} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{si} L_i n_X}{D_X} \quad (7a)$$

$$\mu_{s,bY} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{si} L_i n_Y}{D_Y} \quad (7b)$$

式中, $\mu_{s,bX}$ 和 $\mu_{s,bY}$ 分别为 X 方向和 Y 方向上的层体型系数; μ_{si} 和 L_i 分别为测点 i 的局部体型系数和对应长度; n_X 和 n_Y 分别为风压矢量在 X 和 Y 方向的方向余弦; D_X 和 D_Y 分别为 X 和 Y 方向上分段层截面的参考长度; n 为测压层的测点总数。

5. 围护结构设计的风压试验结果分析

5.1. 围护结构设计风压计算方法

对于建筑表面设计用风荷载的确定,按照现行的建筑结构荷载规范及国内外研究进展,可以采用两种方法计算的围护结构设计用风荷载,即阵风风荷载和极值风荷载。在实际应用时,可以偏保守地取两者中不利的一组作为用于建筑表面围护结构设计用风荷载。

经过对比分析两种方法得到的结果可见,无论是最不利负风压还是最不利正风压,电视塔表面的极值风压多数均比阵风风压要略大,可以偏保守地取极值风压作为用于围护结构设计用风荷载。

5.2. 风压的极值统计确定方法

由于紊流场中的风压是个随机变量,因此必须对所记录的数据进行统计分析,以获得各测点在 24 个风向角下对应的平均风压系数和脉动风压系数的根方差 C_{Pmean} 、 C_{Prms} , 和极值风压系数 C_{Pmax} , C_{Pmin} (已换算成以梯度风压为参考风压的系数)。这是另一种确定围护结构设计用风荷载方法。

极值风压系数 C_{Pmax} , C_{Pmin} 的定义如式(8)所示:

$$C_{Pmax} = C_{Pmean} + kC_{Prms} \quad (8a)$$

$$C_{Pmin} = C_{Pmean} - kC_{Prms} \quad (8b)$$

式中, C_{Pmean} 为测点的平均风压系数; C_{Prms} 为测点脉动风压根方差系数; k 为峰值因子。

紊流场中的风压是个随机变量,所以当峰值因子取不同值时,将得到不同的保证率。在本报告中取 $k = 3.5$, 这样,根据概率统计理论,当风压近似服从正态分布时,瞬时风压系数介于 $C_{Pmax,i}$ 和 $C_{Pmin,i}$ 之间的保证率约为 99.95%。

极值风荷载统计方法是根据试验所得的平均风压系数和脉动风压系数,按概率统计方法计算极值风荷载。根据式(10),进一步由 $\omega = C_{Pmax} \omega_G$ 或 $\omega = C_{Pmin} \omega_G$ 并考虑内压可得到各测点在 24 个风向角下的极值风压值。对于每个测点的极值风压值,找出 24 个风向角中的一个最大值和一个最小值,分别称为该测点的最不利正极值风压 $P_{max,R}^{max}$ 和最不利负极值风压 $P_{min,R}^{min}$, 可用于玻璃幕墙等围护结构设计。

6. 电视塔结构风振响应分析

6.1. 结构风致响应分析方法

考虑高耸结构的风振特性[10] [11],采用高频天平基底测力风洞试验测试了电视塔结构基底的静风和

抖振风总荷载，并按照风压高度变化情况将总荷载分布到电视塔各层结构上。在此基础上，结构风致响应分析按静风响应和随机抖振脉动响应分别进行，叠加后获得总的风荷载响应，其中随机抖振脉动响应采用频域方法进行分析。结构风致响应分析所取的参数见表 1，电视塔结构风振响应计算中采用了如下结构阻尼比。

Table 1. Structural wind-induced response analysis parameters

表 1. 结构风致响应分析参数

参数名称	10 年重现期	50 年重现期	100 年重现期
基本风压(kPa)	0.40	0.55	0.60
梯度风高度处风速(m/s)	43.12	50.57	52.81
阻尼比	2%		2%

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序列：

$$\{t_k\} = \{t_{k,m}\} / \lambda_t \quad (9)$$

下标 k 表示第 k 个采样时刻。试验中风速仪安装高度为 0.5 米，相应的风速为 12 m/s。这样，根据式 (9) 将模型系统时间改为实际时间，即由模型测力的风荷载时程数据可得原型的风荷载时程。

6.2. 10 年重现期风振分析结果

计算分析结果显示，X 方向、Y 方向和绕竖轴扭转方向的响应均以相应方向的基本模态为主，高阶模态响应很小。此外，计算结果还显示：由于结构的对称性，扭转响应较小，因此，本报告主要给出 X 方向、Y 方向的响应计算结果。

通过计算，得出 24 个风向角对应的 2% 阻尼比主体结构顶层(H = 139.4 m)的加速度峰值(加速度响应峰值因子取 2.0)，在 10 年重现期强风和 2% 阻尼比情况下，主体结构顶层(H = 139.4 m)的 X 和 Y 方向最大加速度响应分别 2.2292 m/s² 和 2.2535 m/s²，总加速度最大峰值都发生在 120° 风向角，为 2.4723 m/s²。

6.3. 50 年和 100 年重现期风振分析结果

风振分析以 50 年重现期为基准，对于 100 年重现期，则相应的结构风振响应结果需乘以系数 1.111。

通过计算得出了各风向角下 50 年重现期和 2% 阻尼比结构各层位移响应均值、风振(抖振)位移峰值和位移极值，其中位移响应峰值因子取为 2.0。为便于应用，计算了各风向角对应的主体结构顶层位移的均值、风振位移响应峰值和极值。表 2 列出了在 50 年重现期和 2% 阻尼比情况下各主要风向角对应的结构各层等效静力风荷载。在 50 年重现期和 2% 阻尼比情况下，电视塔主体结构顶层 X 方向位移最大极值发生在 180° 风向角，为 0.6510 m，Y 方向位移最大极值发生在 270° 风向角，为 0.6051 m；电视塔天线顶部 X 方向位移最大极值发生在 300° 风向角，为 1.545 m，Y 方向位移最大极值发生在 240° 风向角，为 1.4735 m；50 年重现期风速作用下最大基底剪力发生在风向角为 180 度时，为 2153.8 kN；最大弯矩发生在风向角为 180 度时，为 189122.7 kN·m。

为了便于结构设计和分析，计算了主体结构在各个来流风向作用时体轴和风轴坐标系的体型系数(该体型系数已换算至风剖面指数为 0.16 的大气边界层 B 类紊流场)，表 3 列出了在 50 年重现期和 2% 阻尼比情况下各主要风向角对应的电视塔主体结构的体型系数。电视塔 139.4 米以下主体结构部分体型系数(参考宽度为 19 米)在来流风向角为 180 度时取得最大值 0.601。139.4 米以上天线部分的体型系数(以天线在体轴方向上的投影宽度为参考宽度)为 0.60。

Table 2. Total internal force of overall section at the bottom of TV tower at main wind direction angle
表 2. 主要风向角电视塔底整体截面总内力

风向工况	整体截面总内力				
	QX (kN)	QY (kN)	MZ (kN·m)	MX (kN·m)	MY (kN·m)
0	1950.7	530.1	2151.4	45726.1	173876.0
30	1581.6	1204.7	2351.5	106972.6	140639.0
60	1219.2	1841.4	2271.1	160696.8	111281.6
90	593.0	1991.3	2065.1	174761.5	56178.8
120	1630.7	1918.7	2297.0	171265.1	146921.0
150	1893.0	1164.2	2027.3	104305.1	166665.6
180	2153.8	519.0	1123.6	46275.3	189122.7
210	1920.8	1109.9	936.0	98270.0	169434.8
240	1537.3	1879.6	1141.3	164781.0	136848.7
270	667.2	1961.0	936.7	172105.6	63188.9
300	1375.2	1835.9	539.6	163425.8	124447.7
330	1653.0	1224.6	860.6	109259.1	146898.6

基于上述电视塔结构风振响应分析结果，建议电视塔结构在设计分析中采用的风振系数为 1.33。

Table 3. Shape coefficient of main structure of TV tower at main wind direction angle
表 3. 主要风向角电视塔主体结构的体型系数

风向工况	体轴坐标系		风轴坐标系	
	X 方向	Y 方向	顺风向	横风向
0	-0.507	0.000	0.507	0.000
30	-0.420	-0.285	0.221	0.457
60	-0.225	-0.503	-0.323	0.447
90	0.053	-0.566	-0.566	-0.053
120	0.335	-0.502	-0.267	-0.541
150	0.517	-0.275	0.310	-0.496
180	0.601	-0.013	0.601	-0.013
210	0.525	0.260	0.325	0.488
240	0.341	0.506	-0.268	0.548
270	0.059	0.560	-0.560	0.059
300	-0.237	0.482	-0.299	-0.447
330	-0.430	0.284	0.230	-0.461

6.4. 风洞实验结果与规范对比分析

根据风洞实验结论，结构主体部分为 0.601 (参考宽度为 19 米)，天线部分为 0.6 (以天线在体轴方向上的投影宽度为参考宽度)，风振系数为 1.33，其中结构风振响应分析中已经考虑顺风向和横风向风致振

动效应。此外,按规范计算所得风荷载作用下结构基底剪力及基底倾覆弯矩,如表 4 所示,均小于风洞实验结果。因此结构设计时采用风洞实验报告提供的风荷载参数作为风荷载输入的依据。

Table 4. Comparison of internal force between wind tunnel test and code
表 4. 风洞实验与规范内力对比

基底内力比较	基底剪力(kN)	基底倾覆弯矩(kN·m)
规范计算结果	1821.6	144465.8
风洞实验结果	2153.8	189122.7

7. 结论

通过对高耸钢结构电视塔风洞测压试验及风振分析,得到如下结论和建议:

1、按照现行的建筑结构荷载规范及国内外研究进展,本文提供了两种方法计算的围护结构设计用风荷载,即规范提供的阵风风荷载和极值风荷载。在实际应用时,建议偏保守地取极值风荷载作为用于围护结构设计用风荷载。

2、基于试验得到的体形系数,计算的 10 分钟平均风荷载(50 年或 100 年重现期)作为结构设计的基本参数。在此基础上,通过结构风振分析给出了高耸结构各层的平均风荷载和抖振等效风荷载,可供结构整体设计使用,其中结构风振响应分析中已考虑顺风向和横风向风致振动效应。

3、电视塔 139.4 米以下主体结构部分的等效体型系数(参考宽度为 19 米)在来流风向角为 180 度时取得最大值 0.601。139.4 米以上天线部分的体型系数(以天线在体轴方向上的投影宽度为参考宽度)为 0.60。

4、根据风洞实验与按规范计算所得风荷载作用下结构基底剪力及基底倾覆弯矩,规范计算结果均小于风洞实验结果,因此结构设计时采用风洞实验报告提供的风荷载参数可作为风荷载输入的依据。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高耸结构设计标准: GB 50135-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [4] 马人乐. 钢塔的非线性动力分析[J]. 建筑结构学报, 1986(3): 45-56.
- [5] 李君, 张耀春. 高层钢结构的非线性动力全过程分析方法[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(1): 16-19.
- [6] 任志刚, 李培鹏, 王乾坤. 复杂高耸钢结构电视塔风振响应分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 137-143.
- [7] 禹慧, 马人乐, 何敏娟. 复杂高耸结构三维风振响应时程分析[J]. 特种结构, 2007, 24(4): 45-49.
- [8] 鄧伦海, 毛硕. 高耸结构风荷载特性的风洞试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(1): 35-42.
- [9] 李秋胜, 李慧真, 李毅. 椭圆形高耸结构风荷载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 1-8.
- [10] 华坤, 彭益成, 陈轩, 等. 独立式避雷针风振响应分析及结构优化[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1789-1793.
- [11] 王世村, 孙炳楠, 楼文娟. 单杆输电塔气弹模型风洞试验研究和理论分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 87-91.