

文章编号:1671-6833(2012)02-0076-05

## 某移动通信塔强风作用下抗倾覆分析

王国砚, 赵鹏转

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

**摘要:** 强风作用下某结构高耸的通信塔可能发生倾覆的问题, 根据惯性风荷载法理论, 采用数值风洞得到的塔体表面沿高度分段风压体型系数, 考虑塔体前6阶振型的影响, 得到强风作用下13个风向塔体风振响应计算结果. 基于塔体风振响应结果, 并考虑一体化机房上作用风力, 对此通信塔进行抗倾覆研究. 通过分析研究, 得到了此通信塔抗倾覆最不利风向角为 $90^\circ$ , 移动基础安全设计重量为15.8 t. 分析结果表明, 计算方法可靠合理, 同时也为通信塔类结构的风振和抗倾覆分析提供一种可参考的方法.

**关键词:** 通信塔; 等效惯性力法; 风振响应; 抗倾覆分析

**中图分类号:** TU311.2 TU352.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.02.019

### 0 引言

随着通信行业的发展, 移动通信塔的数量逐年增多. 移动通信塔多建于空旷高地, 塔体结构具有高柔、轻质、小阻尼等特性, 对风的作用非常敏感, 尤其在强风作用下, 若下挂基础重量不足, 通信塔则存在倾覆的可能性. 因此对移动通信塔类结构进行风振分析, 并进行抗倾覆验算, 具有重要的安全 and 经济价值.

结构的风振响应主要包括顺风风向风振响应和横风向风振响应. 静力等效风荷载法是目前结构设计中最普遍应用的结构顺风风向风振响应计算方法, 这种方法主要包括: Kasperski<sup>[1]</sup>提出的荷载-响应相关法(LRC); Holmes<sup>[2]</sup>提出的采用LRC法与等效风振惯性力相结合的背景分量和共振分量组合法. 加拿大国家规范采用的阵风荷载因子法(GLF), 中国国家规范采用的惯性风荷载法(GBJ)<sup>[3]</sup>. 结构横风向风振的机理比较复杂, 影响因素很多, 而对于圆截面结构的绕流问题, 主要考虑其涡激振动<sup>[4]</sup>.

目前, 国内外对结构风振分析的研究非常广泛. 邓洪州等<sup>[5]</sup>对输电塔类结构进行风振分析. 陈玮等<sup>[6]</sup>对高层建筑进行风荷载数值模拟并进行空间风振分析. 李华等<sup>[7]</sup>对体育场大跨屋盖结构进行风振分析, 但鲜见有文献对移动通信塔类结构风振响应和抗倾覆进行分析研究. 笔者采用

惯性风荷载法, 考虑高阶振型的影响, 基于CFD数值模拟得到的塔体沿高度分段体型系数, 对强风作用下某移动通信塔塔体风振响应进行分析, 并基于风振响应结果对整个通信塔进行抗倾覆验算, 以期为通信塔基础重量设计提供依据, 同时也为此类结构风振分析提供一种参考方法.

### 1 研究对象

笔者以某通信塔为研究对象, 如图1. 塔体结构使用不同尺寸的无缝钢管; 塔体结构22 m、25 m和28 m处连接有3付对称布置的天线支架; 底部为一体化封闭机房; 塔体通过两个细杆与机房连接, 塔体底部与机房底座固定; 因便携移动式设计, 此通信塔平放于地面, 无深坑地基或桩基固定,

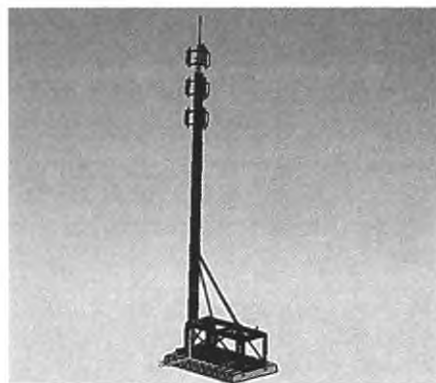


图1 移动通信塔

Fig.1 Telecommunication tower

收稿日期:2011-11-20; 修订日期:2012-01-20

**作者简介:** 王国砚(1958-), 男, 安徽蚌埠人, 同济大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构风工程与结构动力学方面的研究, E-mail: gywang@tongji.edu.cn.

主要依靠下挂移动钢筋混凝土基础以提供平衡抗力。

## 2 风振响应计算

风的作用分为平均风和脉动风两部分,平均风周期远高于一般结构的自振周期,作用性质是静力的,而脉动风下结构风响应的性质是动力的、随机的<sup>[3]</sup>。通信塔塔体结构具有高柔、轻质、小阻尼的特性,对脉动风的作用特别敏感,风振响应原理复杂;机房上主要受平均风作用,表面风荷载容易计算。为使抗倾覆分析方便易行,笔者利用空间截面法,将通信塔“化整为零”,分为塔体、机房两个部分。先对高耸塔体结构进行风振计算,然后再考虑机房上作用风力,对整个通信塔进行抗倾覆分析。

### 2.1 顺风向塔体结构风振响应

#### 2.1.1 顺风向风振响应公式推导

将塔体简化为有限自由度体系,根据随机振动理论,基于惯性风荷载法,考虑高阶振型影响,推得塔体平均风荷载和各阶振型等效脉动风荷载计算公式<sup>[8]</sup>。

平均风荷载为

$$p_{si} = \mu_{si} \mu_{zi} w_0 A_i \quad (1)$$

式中: $p_{si}$ 为*i*点平均风压; $\mu_{si}$ 为*i*点风压体型系数; $\mu_{zi}$ 为*i*点风压高度变化系数; $A_i$ 为*i*点迎风面的面积; $w_0$ 为基本风压系数。

各阶振型等效脉动风荷载,依据荷载规范<sup>[1]</sup>采用 Davenport 脉动风速谱模型和 Shiotani 空间相关性模型推得

$$p_{dji} = \xi_j u_j \phi_{ji} M_i w_0 \quad (2)$$

$$\xi_j = \sqrt{\frac{2}{3} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_0^2 / [n(1+x_0^2)^{4/3}]}{[1 - (\frac{n}{n_j})^2]^2 + [2\xi_j \frac{n}{n_j}]^2} dn} \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{1.200n}{v} \quad (4)$$

$$u_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n M_i \phi_{ji}^2} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \mu_{fi} \mu_{zi} \mu_{si} A_i \mu_{fk} \mu_{zk} \mu_{sk} A_k \rho_{iik} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: $p_{dji}$ 为第*j*振型*i*点等效脉动风荷载; $\xi_j$ 为*j*振型脉动增大系数; $u_j$ 为*j*振型影响系数; $\mu_{fi}$ 、 $\phi_{ji}$ 分别为*i*点处脉动系数和第*j*振型位移系数; $M_i$ 为*i*点质量; $n_j$ 为塔体第*j*阶振型频率; $v$ 为参考风速值。

将计算得各节点顺风向平均风荷载和各阶振型等效脉动风荷载,定义为不同工况加载到塔体

模型节点,脉动风荷载总响应由各振型的动力响应按平方总和开方求得,然后与平均风响应线性叠加,得到顺风向塔体总响应公式:

$$R_i = R_{pi} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} R_{dji}^2} \quad (6)$$

式中: $R_i$ 为塔体结构*i*点任意响应; $R_{pi}$ 为*i*点平均风响应; $R_{dji}$ 为*i*点第*j*振型脉动风动力响应。

#### 2.1.2 顺风向风振响应参数

通过以上对塔体顺风响应公式推导,要得到塔体顺风向风振响应,需确定风压高度变化系数 $\mu_{zi}$ 、基本风压系数 $w_0$ 、脉动系数 $\mu_{fi}$ 、迎风面面积 $A_i$ 、质量信息 $M_i$ 、风压体型系数 $\mu_{si}$ 、塔体结构模态信息:各节点各阶振型 $\phi_{ji}$ 和振型频率 $n_j$ ,本文根据工程实际和数值风洞对上述参数给予指定。

(1) 地貌信息。此通信塔多处于空旷高地,故依据地面粗糙度选取 B 类地貌,取

$$\mu_z(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.32} \quad (7)$$

$$\mu_f(z) = 0.5 \times \left(\frac{z}{10}\right)^{-0.16} \quad (8)$$

处于工程安全考虑,取强风风速 $v$ 为 32 m/s,即基本风压 $w_0 = 0.64 \text{ kN/m}^2$ 。

(2) 风压体型系数。由于通信塔圆截面塔体上 3 个高度处存在天线支架而导致塔体体型突变,下部有横向尺寸较大的机房的干扰影响作用,结构荷载规范中没有直接针对此类结构的体型系数规定,故笔者基于 Fluent6 平台,对通信塔风场进行三维数值模拟,考虑到通信塔沿一主轴对称,且不考虑周围环境影响,故每 15° 模拟一次,风向角如图 2,得到 13 个风向向下塔体表面沿风向和垂直风向的分段体型系数,并采用加权平均法得到塔体表面整体体型系数。由于篇幅有限,以下仅列出塔体整体体型系数,如表 1 所示。

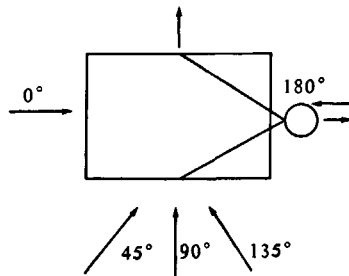


图2 通信塔结构平面与风向角示意图

Fig.2 Layout of model and wind angels

分析表 1 可以得出:沿风向塔体整体体型系数随风向变化较小,且略高于荷载规范<sup>[3]</sup>中圆截面结构整体体型系数取值(0.7),若参考规范<sup>[3]</sup>

取值,计算结果将趋于不安全;底部横向尺寸较大机房的干扰影响和天线支架导致的塔体外形突变,致使垂直风向塔体整体体型系数随风向改变较大;塔体体型系数采用沿两个方向分段形式,合理且偏于安全,塔体风振响应分析应采用基于数值模拟得到的风压体型系数。

表 1 通信塔塔体整体体型系数  
Tab. 1 Integral shape coefficients of tower body

| 风向角<br>/(°) | 沿风向塔体<br>体型系数 | 垂直风向塔体<br>体型系数 |
|-------------|---------------|----------------|
| 0           | 0.82          | 0.00           |
| 15          | 0.85          | -0.15          |
| 30          | 0.86          | -0.18          |
| 45          | 0.80          | -0.04          |
| 60          | 0.79          | 0.08           |
| 75          | 0.78          | 0.18           |
| 90          | 0.80          | 0.38           |
| 105         | 0.76          | 0.40           |
| 120         | 0.74          | 0.27           |
| 135         | 0.70          | 0.16           |
| 150         | 0.81          | -0.03          |
| 165         | 0.88          | -0.03          |
| 180         | 0.90          | 0.00           |

(3) 模态分析. 以软件 ANSYS 为平台,采用 Beam188 梁单元建立塔体有限元模型如图 3 所示. 材料类型为 steel,密度  $8\,300\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $2.1 \times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比 0.3,与实际结构参数一致. 将塔体模型导入软件 SAP2000 并进行模态分析,得到塔体结构前六阶振型信息,表 2 仅列出塔体模型前六阶自振频率和阻尼比。

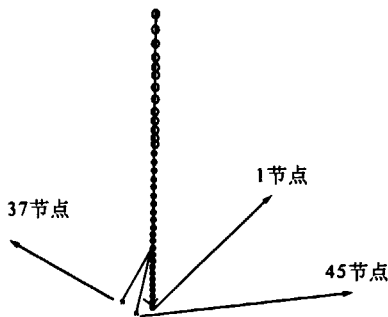


图 3 塔体有限元模型与基底节点  
Fig. 3 Finite element model and basal nodes

(4) 结构参数. 参考塔体结构模型节点信息和结构几何、物理参数,得到塔体模型各节点迎风面积和质量信息。

2.1.3 塔体顺风向响应计算

由以上参数,为保证风振响应计算分析的精确性和实用性,考虑塔体前六阶振型脉动特性,根

据式(1)、式(2),得到 13 个风向下顺风向塔体各节点平均风载荷和各阶振型等效脉动风载荷,将平均风载荷和各阶振型等效脉动风荷载定义为不同工况加载到塔体模型,计算各工况下塔体顺风向风振响应. 参照式(6),对平均风响应和各阶振型动力响应进行处理,得到强风作用下塔体顺风向风振总响应,包括塔体与机房连接的 1,37,45 节点反力。

表 2 塔体自振频率与阻尼比  
Tab. 2 Natural frequency and damping ratio of structure

| 振型 | 频率 $n/\text{Hz}$ | 阻尼比 $\zeta$ |
|----|------------------|-------------|
| 1  | 0.832 037        | 0.01        |
| 2  | 0.861 503        | 0.01        |
| 3  | 3.919 140        | 0.01        |
| 4  | 4.132 317        | 0.01        |
| 5  | 4.927 371        | 0.01        |
| 6  | 5.055 612        | 0.01        |

2.2 横风向塔体结构风振响应

通信塔塔体主体为圆截面结构,荷载规范<sup>[1]</sup>规定对于圆截面结构,需验算结构雷诺数范围以确定是否考虑横风向风振作用,圆截面结构雷诺数为

$$Re = 69\,000vD. \tag{9}$$

式中: $v$ 为计算用风速; $D$ 为结构截面直径. 通过验算,虽然塔体结构临界风速小于来流风速,但塔体结构雷诺数为  $3 \times 10^5 \leq Re \leq 3.5 \times 10^6$ ,处于超临界范围,故可不考虑塔体横风向风振响应。

3 抗倾覆分析

分析时假定通信塔及一体化机房结构在倾覆前,其构件不会首先出现自身屈曲问题,且因结构无深坑地基或桩基固定,故忽略结构与地基间的“土—结”影响作用. 利用式(10)计算机房表面风荷载,将荷载作用到机房迎风面形心,利用塔体风振响应得到的 3 个节点反力,考虑机房重力,对强风作用下 13 个风向移动通信塔进行抗倾覆分析,结构简图如图 4 所示,37 点和 45 点为斜拉杆与机房连接点,1 点为塔体下部与机房固定点。

$$F_w = \beta_z \mu_s \mu_{s0} w_0 A. \tag{10}$$

式中:取  $\beta_z = 1.5, \mu_s = 1.3, \mu_{s0} = 1.0, A$  为机房迎风面积。

通过对通信塔的抗倾覆分析,得到 13 个风向强风作用下  $x, y$  两个方向通信塔保持平衡所需基础的重量和抗滑移力(由基础与地面接触面摩擦力提供),如图 5 所示. 验算过程略。

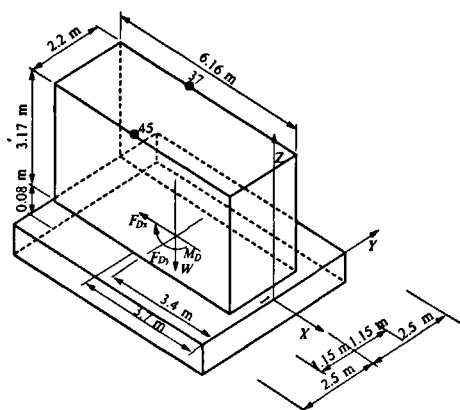


图4 结构简图与坐标系

Fig.4 Diagram of structure and coordinate system

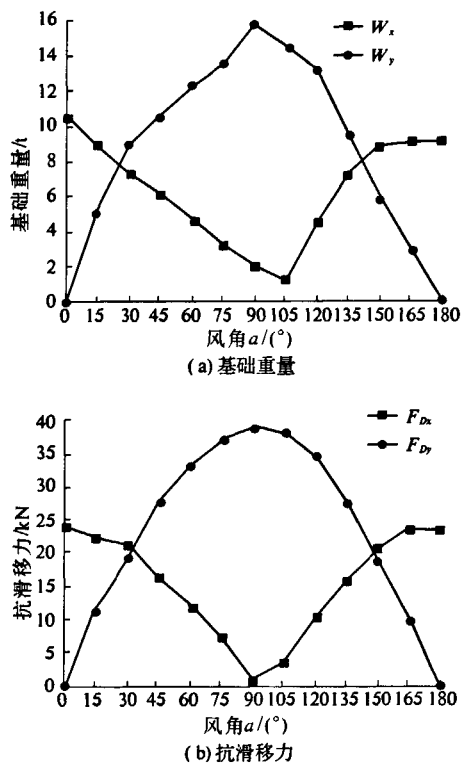


图5 抗倾覆分析结果

Fig.5 Results of analysis to anti-overturning

图5中 $W_x$ 和 $W_y$ 为强风作用下 $x$ 、 $y$ 方向通信塔保持平衡所需基础重量, $F_{dx}$ 和 $F_{dy}$ 为两个方向抗滑移力.由图5可以看出:① $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 风向,随着风向角的变大, $x$ 方向抗倾覆需基础重量和抗滑移力依次减少, $y$ 方向抗倾覆需基础重量和抗滑移力依次增加.② $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 风向,随着风向角的变大,除 $105^{\circ}$ 风向所需基础重量外, $y$ 方向抗倾覆需基础重量和抗滑移力依次减少;除了 $180^{\circ}$ 风向所需抗滑移力外,通信塔 $x$ 方向抗倾覆需基础重量和抗滑移力依次增大.③强风作用下通信塔结构抗倾覆最不利风向为 $90^{\circ}$ ,所需基础重量和抗

滑移力均为最大,因 $90^{\circ}$ 风向下通信塔 $y$ 方向受风力最大,且移动基础 $y$ 方向尺寸(5.0 m)较 $x$ 方向尺寸(6.8 m)小.综合分析,强风以任意风向角度作用于通信塔,若使此结构保持平衡不致倾覆,移动基础重量需超过15.8 t,以此分析结果作为标准,考虑安全系数,可给基础重量一个合理的设计值.

#### 4 结论

笔者采用基于CFD数值模拟得到的塔体分段风压体型系数,运用等效惯性力法,考虑高阶振型影响,对通信塔塔体进行强风作用下风振响应分析.基于塔体风振响应结果,对13个风向下通信塔结构进行抗倾覆验算和分析,得出以下结论:

(1)国家荷载规范规定的体型系数主要是针对规则的单体结构,而工程实际中的通信塔塔体体型多变,且存在外部干扰,建议采用物理风洞或数值风洞确定其最不利风压分布,使计算安全合理.

(2)强风作用下此移动通信塔抗倾覆最不利风向为 $90^{\circ}$ ,为保持通信塔的平衡不致倾覆,钢筋混凝土基础需提供15.8 t的重量,建议以此分析结果作为标准,乘以1.5以上的安全系数,作为基础重量的设计值;同时给出通信塔抗滑移力标准,建议考虑实际基础与地面摩擦系数,作为基础设计的额外参考.

(3)强风作用下,应对有圆截面类塔体的通信塔结构进行雷诺数校核,若结构发生超临界范围内风振,对横风向风振响应可不予处理,主要考虑顺风向的风振响应.

#### 参考文献:

- [1] KASPERSK M, NIEMANN J. The LRC-Method: A general method of estimating unfavourable wind load distributions for linear and non-linear structural behaviour[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/3): 1753 - 1763.
- [2] HOLMES J D. Effective static load distributions in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(2): 91 - 109.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [4] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008: 49 - 75.
- [5] 邓洪洲, 张永飞. 输电塔风振响应研究[J]. 特种结

- 构,2008,25(2):9-13.
- [6] 陈玮,黄本才,赵劲松,等.超高层建筑风荷载数值模拟和空间风振分析[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(5):60-64.
- [7] 李华,黄本才,廖泽邦,等.上海东方体育中心综合体育馆屋盖结构风振分析[J].南昌大学学报:工学版,2010,32(3):265-271.
- [8] 张相庭.工程结构风荷载理论及抗风计算手册[M].上海:同济大学出版社,1990:83-119.

## Analysis of Anti-overturning of a Telecommunication Tower Under Strong Wind

WANG Guo-yan, ZHAO Peng-tuan

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A telecommunication tower is liable to be overturned under strong wind since the tower body is a high-rise structure. Based on inertial wind load method, in consideration of the distribution of multiple spatial 6 models and the segment shape coefficients of tower body according numerical wind tunnel, wind-induced response of tower body in 13 different wind attack angles are calculated. Based on the wind-induced response and the wind loads on motor room, analysis of anti-overturning of tower is checked. The research results are the most unfavorable attack angle is  $90^\circ$  direction and the scientific data for the design of mobile foundation is 15.8t. The results of analysis show that the method adopted in this paper is reasonable, at the same time the method is presented for the analysis of wind-induced and anti-overturning of structures such as the telecommunication tower.

**Key words:** telecommunication tower; inertial wind load method; wind-induced response; analysis of anti-overturning

(上接第 75 页)

## Test on Influence Factor of Splitting Strength for Foamed Asphalt Recycled Mix

ZHAO Gui-juan

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different foam asphalt content and content of milling material from asphalt pavement (RAP) on splitting strength of the foam asphalt recycled mix, two different milling materials from asphalt pavement which will be called  $RAP_1$  and  $RAP_2$  were chosen. The old material volume which is respectively 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and the foam asphalt content which is 2%, 2.5%, 3%, 3.5%, 4% were mixed, and mixed foamed asphalt recycled mix, molded piece, determined dry and wet splitting strength (ITS) and residual splitting strength ratio (TSR). The results showed when old material content proportion was a certain condition, the foam asphalt content of mixture reached an optimum value. As the RAP content increased gradually, optimum asphalt content of foamed asphalt recycled mix was reduced gradually, and the value changed from 3.5% when RAP was 0 to 2% when RAP was 80%. As the RAP content increased, dry and wet ITS of foamed asphalt recycled mix decreased, but TSR increased.

**Key words:** foamed asphalt; recycled mix; splitting strength; optimum asphalt content; old material content; RAP