

天线抖振响应的计算分析与风洞试验研究

洪小健, 黄鹏, 王建平, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对置于某一超高层建筑顶部的钢质天线的抖振响应进行了研究。首先用随机振动理论计算了天线的抖振响应, 而后在风洞中对天线的气动弹性模型进行了试验, 最后还分析了天线的鞭梢效应。计算和试验结果为天线结构的分析设计提供了可靠依据。

关键词: 钢质天线; 抖振; 气动弹性模型; 鞭梢效应

中图分类号: U 441.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2003)03-0277-05

Computation and Wind Tunnel Test of Antenna Buffeting Response in Wind

HONG Xiao-jian, HUANG Peng, WANG Jian-ping, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The research of the buffeting response of the steel antenna at the top of one super-high rise building is presented in this paper. Firstly, the random vibration theory is implemented to compute the buffeting response; secondly the aeroelastic model of the antenna has been tested in a wind tunnel. The whiplash effect of antenna is finally numerically analysed. The numerical and experimental results provide the reliable basis for the structure analysis and design.

Key words: steel antenna; buffeting; aeroelastic model; whiplash effect

某超高层建筑位于强风区、D类场地; 主楼高度为245 m。在主楼顶部对称地安置有两个完全相同的钢质天线, 天线单体形式见图1。主杆的高度为88 m, 主杆的两侧为相互垂直的两个支撑斜杆。主杆的截面为由下往上的径缩的圆环截面, 底部截面的外径为1.5 m, 顶部截面的外径为0.5 m, 30 m以下的主杆的壁厚为4 cm, 30 m以上的主杆的壁厚为2 cm。由于这种阻尼较低、柔度较大的天线结构是安置在245 m超高层建筑的顶部, 风荷载对天线的受力及变形将起到控制作用, 因此必须进行风荷载作用下天线的抗风研究, 为天线结构的安全可靠性分析提供依据。另外主楼顶部振动时, 天线可能会产生较强的鞭梢效应。根据以上分析, 研究天线风振响应时假定实际天线的振动可分为两个部分: ① 天线底部固定不动, 在脉动风作用下的响应; ② 由于主楼顶部振动引起的鞭梢效应。本文中第一部分将通过随机振动理论计算和天线气动弹性模型的风洞试验得出, 第二部分将由近似方法计算得出。

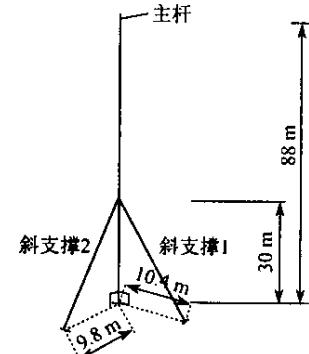


图1 天线尺寸

Fig.1 Dimension of antenna

1 天线顺风向抖振响应计算

首先介绍天线顺风向抖振响应计算方法.以广义坐标表达的第 i 阶振型的动力方程为

$$\ddot{Y} + 2\zeta_i\omega_i\dot{Y} + \omega_i^2Y = \frac{\int_0^H \phi_i(z)P(t, z)dz}{\int_0^H m(z)\phi_i^2(z)dz} = F_i \quad (1)$$

式中 $\phi_i(z)$ 是第 i 阶振型函数; $m(z)$ 是单位长度上的质量; $P(t, z)$ 是随机风荷载.根据随机振动理论, 考虑风荷载空间相关性的天线顶部位移功率谱为

$$S_Y(\omega) = |H_i(\omega)|^2 S_{F_i F_i} = \frac{1}{[(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_i\omega_i)^2\omega^2]} \cdot \frac{\int_0^H \int_0^H \int_0^D(z) \int_0^{D(z')} \phi_i(z)\phi_i(z')S_{\omega\omega'} dx dx' dz dz'}{\int_0^H m(z)\phi_i^2(z)dz \int_0^H m(z')\phi_i^2(z')dz'} \quad (2)$$

式中 $D(z)$ 是主杆在 z 高度处的截面外径; H 是天线总高度; $\phi_i(z)$ 是第 i 阶振型; $S_{\omega\omega'}$ 是考虑高度方向上风荷载空间相关性的达文波特风压谱^[1]:

$$S_{\omega\omega'} = \rho^2 C_D^2 v(z)v(z')S_v(\omega) \exp\left(-10\omega \frac{|z - z'|}{U_z(2\pi)}\right) \quad (3)$$

式(3)中的 C_D 为阻力系数, 它是与雷诺数有关的一个值^[2], 在风速变化的时候, 雷诺数将发生变化, 阻力系数也将发生变化. 位移响应的均方根由下式通过数值积分计算得到:

$$\sigma_Y = \left(\int_0^{+\infty} S_Y d\omega \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\int_0^{+\infty} \frac{1}{[(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_i\omega_i)^2\omega^2]} \frac{\int_0^H \int_0^H \int_0^D(z) \int_0^{D(z')} \phi_i(z)\phi_i(z')S_{\omega\omega'} dx dx' dz dz'}{\int_0^H m(z)\phi_i^2(z)dz \int_0^H m(z')\phi_i^2(z')dz'} d\omega \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

天线结构的频率和振型是用 Ansys 软件计算的, 结构的前两阶频率分别为 0.27 Hz 和 1.06 Hz, 天线主杆的第一阶振型和第二阶振型如图 2 和图 3 所示. 抖振计算中第一阶振型阻尼比和第二阶振型阻尼比都取为 0.5%.

计算天线位移响应时, 平均风速的取值除了从 6 m.s⁻¹ 开始到 40 m.s⁻¹ 结束以外, 还计算了当地 30 年重现期、50 年重现期、100 年重现期天线顶部风速(47.9 m.s⁻¹、49.7 m.s⁻¹、52.2 m.s⁻¹)作用下的天线顶部位移均方根, 式(4)计算结果与下文中试验顺风向响应结果一起在图 4 中给出. 天线顶部顺风向位移响应峰值应为图 4 中位移响应均方根乘以峰值因子 $g = 3.5$.

计算表明随着风速的增加, 响应量呈现二次曲线形式增加. 在较高风速的作用下, 天线顶部位移响应较大. 100 年重现风速作用下, 天线顶部峰值位移达到 2.5 m. 建议考虑增加构件刚度或其它减小振动响应的措施. 此外计算结果还表明即使在高风速的激励下, 天线顶部位移响应仍是以第一振型为主. 相对而言, 高阶振型的响应很小. 万方数据

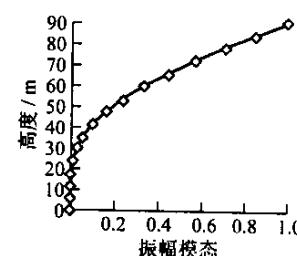


图 2 主杆第一振型

Fig.2 First vibration mode of the main pole

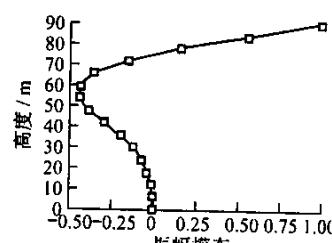


图 3 主杆第二振型

Fig.3 Second vibration mode of the main pole

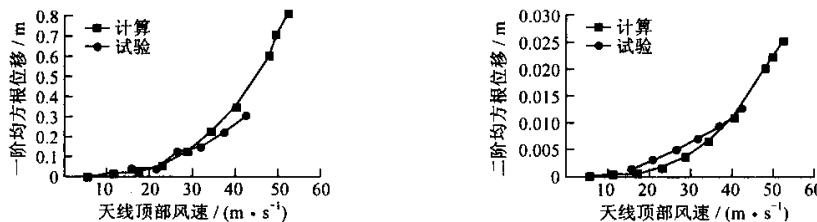


图 4 抖振位移响应比较

Fig. 4 Buffeting displacement response comparsion

2 气动弹性模型风洞试验

2.1 气动弹性模型的设计和制作

天线气动弹性模型试验是在同济大学 TJ-1 风洞中进行的,根据气动弹性模型设计的相似准则^[3],确定模型的设计参数。由 TJ-1 风洞的尺寸,并结合模型缩尺比尽可能大的要求,取模型与实际结构几何尺寸比例为 1:50,风速比为 1:2.5。由尺寸比和风速比得到其它动力参数的相似关系。根据表 1 所示的模型参数比,确定天线模型的结构参数。

顶部天线模型采用壁厚为 0.1 mm 黄铜皮卷成具有锥度的细长圆锥,在接合处用锡焊连接。模型的配重分段粘于模型的内部,模拟原结构的质量分布,模型尺寸详见图 5。实际模型完成之后测得其一阶频率为 5.2 Hz,第二阶频率为 24.0 Hz,与模型设计频率的误差分别为 3.7% 和 11.0%。实际模型阻尼比为 0.5%,试验模型完全符合设计要求。

2.2 气动弹性风洞试验

由于实际天线高度在 245~333 m 之间,其平均风速沿着高度的变化已经很小,所以在风洞中模拟的平均风速略偏保守地取为沿高度不变。此外在风洞中使用了格栅模拟风场中的紊流,紊流度为 12%。已有的研究^[4]表明在具有较大湍流度的流场中,雷诺数对结构响应的影响不大,故模型与实际结构雷诺数差异的影响可忽略。

风场模拟和安装于风洞中的气弹模型的照片见图 6。试验模拟风向角度为 0°,22.5°,45.0°,67.5°,90.0°。振动测量方向(定义为 x 和 y 方向)和风向角的定义如图 7 所示。试验风速分别取为 6.0 m·s⁻¹,8.0 m·s⁻¹,10.0 m·s⁻¹。

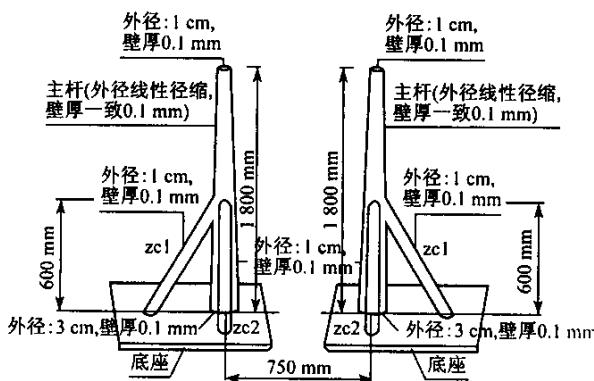


图 5 试验模型

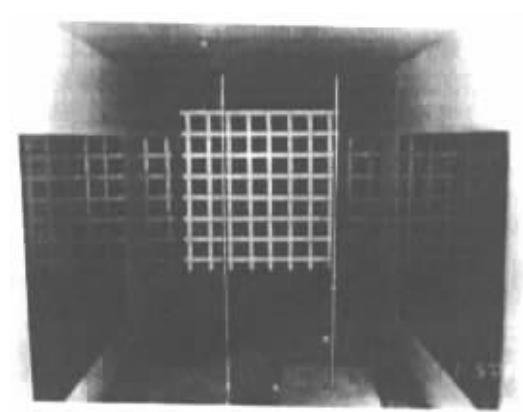


图 6 模型照片

$m \cdot s^{-1}$, $12.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $14.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $16.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应于实际天线顶部风速 $15.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $21.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $26.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $31.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $37.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $42.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对直接测量得到的加速度响应量进行统计得到加速度响应的均方根。由图 8 可见随着风速增加加速度响应分量也在增加, 风向角对响应分量有明显影响, 且横风向没有出现高阶涡激振动。

试验的位移响应不是简单地通过加速度对时间的二次积分得到的, 而是对加速度的时程进行快速傅里叶变换(FFT)得到加速度的功率谱, 结合随机振动理论中位移功率谱与加速度功率谱的关系式(5)^[5] (其中 S_D 是位移功率谱, S_a 是加速度功率谱), 在结构振型的特征频率附近进行数值积分求得响应方差。

$$S_D(\omega) = \frac{1}{\omega^4} S_a(\omega) \quad (5)$$

x , y 方向上的第一阶振型位移响应分量见图 9, 风向角对位移响应分量有明显影响。总的位移响应采用两个方向上的一阶位移响应平方之和开平方计算(式 10), 不同风向角度的位移响应如图 10 所示。

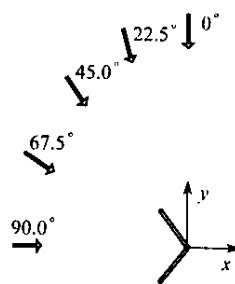


图 7 风向角

Fig. 7 Wind - approach angle

(6)

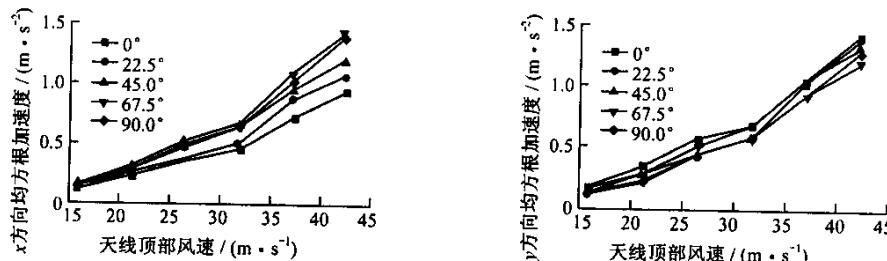


图 8 加速度响应

Fig. 8 Acceleration response

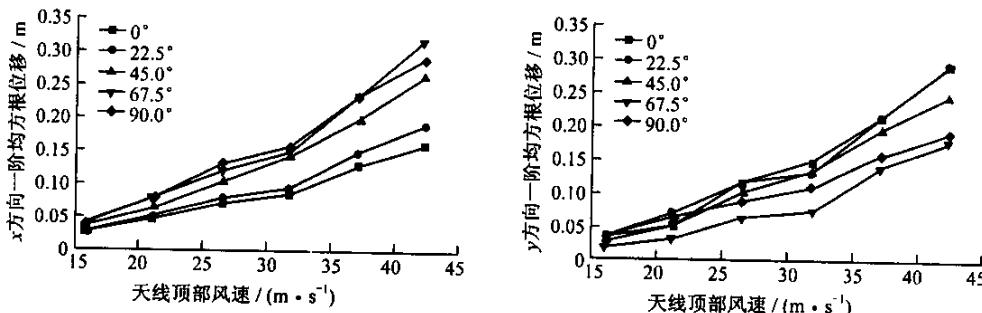


图 9 一阶位移响应分量

Fig. 9 First mode response component of displacement

图 10 表明相同风速作用下, 风向角度的大小对总响应影响不大, 也表明两个天线单体之间的气动干扰较小。取风向角度为零度时 y 方向位移响应作为试验中顺风向位移响应的大小。风洞试验的一阶顺风向和二阶顺风向位移响应结果及与相应的抖振响应计算结果的比较见图 4。在较高风速下理论计算结果略大于试验结果, 因此建议依据计算结果进行桅杆结构的校核。

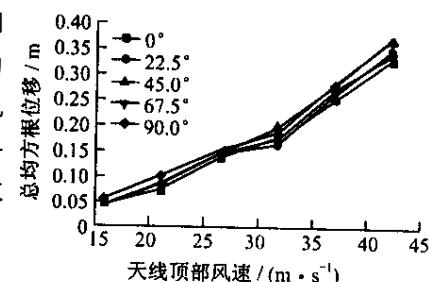


图 10 一阶位移总响应

Fig. 10 Total first mode response of displacement

3 鞭梢效应计算

主楼振动时, 天线有可能发生较大的鞭梢效应。天线的鞭梢

万方数据

效应可按照文献[6]给出的近似计算公式求得,其计算表达式为

$$y = ky_0 \quad (7)$$

式中: y_0 表示主楼结构顶部振动幅值; k 表示鞭梢效应系数; y 表示天线结构顶部的最大位移幅值。 y_0 与 k 的计算公式为

$$y_0 = \xi_{11} u_{11} \omega_0 / \omega_{11}^2 \quad [6] \quad (8)$$

$$k = \frac{\sqrt{(\xi_1 u_1 / \omega_1^2)^2 + (\xi_2 u_2 / \omega_2^2)^2}}{\xi_{11} u_{11} / \omega_{11}^2} \quad (9)$$

式中: ω_{11} 是主楼结构的基本频率; ω_1, ω_2 是主楼与上部天线组成的两自由度体系的基本频率.当上部天线与主楼的质量比很小,且主楼的基本频率与天线的基本频率比较接近时,可认为 ω_1 等于 ω_{11} ,而 ω_2 就等于天线基本频率.在本文中 $\omega_1 = \omega_{11} = 0.22 \text{ Hz}$, $\omega_2 = 0.27 \text{ Hz}$. ξ_1, ξ_2, ξ_{11} 分别是脉动增大系数, u_1, u_2, u_{11} 为脉动影响系数,其计算公式详见文献[6].这些系数取决于建筑物所在的场地、建筑物高度等诸方面条件。 ω_0 是 B 类地区、10 m 高度处,重现期为 30 年的基本风压.

在上海市区 30 年重现期的标准风速(天线顶部风速为 47.9 m.s^{-1})作用下,按式(4)计算得到天线顶部一阶位移响应均方根为 0.62 m.于是天线底部固定不动时,抖振响应峰值为 2.2 m.按式(7)~(9)计算得 $y_0 = 0.1 \text{ m}$, $k = 8$,于是天线的鞭梢响应峰值 y 为 0.8 m.比较以上计算结果可知对于本文研究的天线而言,脉动风的激励是结构风振响应的主要激励.相对而言,主楼结构振动引起的鞭梢响应要小得多.无论是脉动风直接激励引起的天线振动还是主楼受风荷载作用振动引起的顶部天线的鞭梢效应,本质上都是随机振动.风工程中常认为结构在脉动风荷载作用下的响应为零均值高斯过程,且可以近似假定脉动风直接激励引起的天线振动和主楼振动引起的天线鞭梢效应是相互独立的,于是天线顶部实际位移响应峰值可以采用鞭梢响应峰值与抖振响应峰值平方之和再开方的方法计算.

4 结论

本文对置于某一超高层建筑顶部的钢质天线的抖振响应进行了理论分析和试验研究,主要结论如下:

- (1) 在高风速作用下,天线顶部位移偏大,需考虑增大天线截面刚度或其它减少振动的措施.
- (2) 高阶振型对天线总位移响应贡献偏小,即使高风速激励作用,位移响应仍以第一振型为主.
- (3) 对本文中研究的天线结构而言,脉动风激励是结构振动响应的主要激励,风荷载作用下主楼结构振动引起的鞭梢响应相对较小.

参考文献:

- [1] 张相庭.结构风压和风振计算[M].上海:同济大学出版社,1985.
- [2] 刘尚培.风对结构的作用[M].上海:同济大学出版社,1988.
- [3] 林志兴.高等结构试验(3)——抗风试验[M].上海:同济大学出版社,1999.
- [4] So R Mc Savkar S D. Buffeting forces on rigid circular cylinder in cross-flow[J]. J Fluid Mech, 1981, 105: 397-425.
- [5] 张湘伟.结构分析中的概率方法[M].北京:科学出版社,2000.
- [6] 张相庭.工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M].上海:同济大学出版社,1990.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>