

基于有限振动信号的某移动天线有限元风荷载动力反应分析

刘晶波¹, 郭东¹, 王宗纲², 费毕刚¹, 王潜渊³

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084;
3. 中国移动通信集团 北京分公司, 北京 100007)

摘要: 提出了一种现场实测的有限振动信号与结构有限元模型模拟分析相结合的方法来获得结构(天线)在实际风荷载作用下的动力反应, 即首先测试结构在脉动风荷载作用下的有限振动信号, 如: 加速度时程和频谱曲线, 然后通过结构运动方程模拟出脉动风荷载时程并施加到结构有限元模型中, 通过有限元计算求出模拟风荷载与实际风荷载之间的修正系数 k , 最后把修正后的风荷载时程再次施加到有限元模型中进而得出结构在实际脉动风荷载作用下的内力。通过比较, 有限元分析结果与试验结果吻合较好, 为结构在脉动风荷载作用下的全过程反应分析提供了一种简便方法。

关键词: 有限振动信号; 风荷载; 动力反应分析

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

Finite element dynamic response analysis under wind loads for antenna of China mobile based on limited vibration signals

LIU Jing-bo¹, GUO Dong¹, WANG Zong-gang², FEI Bi-gang¹, WANG Qian-yuan³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, BeiJing 100084, China;
2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, BeiJing 100084, China;
3. China Mobile Communication Corporation BeiJing Branch, BeiJing 100007, China)

Abstract: A new method to perform the finite element analysis based on limited vibration signals measured on the spot was presented. The limited vibration signals of dynamic responses of structures (antennae of China Mobile) were measured under impulsive wind loads, such as the signals of acceleration time histories and their frequency spectra. Meanwhile, the time histories of impulsive wind loads were simulated through the equation of motion of the structures, which were then applied to the finite element model. It the light of this finite element analysis, the correction factor k between simulated wind loads and practical wind loads was obtained, and the revised wind loads was applied again to the model. The internal forces of structure were thus gained under the closer approximation of practical impulsive wind loads. It is shown that the finite element analysis can get the results in accordance with those of experiments, which provides an easy method for total process analysis of structures under impulsive wind loads.

Key words: limited vibration signals; wind loads; dynamic response analysis

风荷载是建筑物的主要荷载之一, 它与地震荷载一样是建筑结构常遇的水平荷载。对于高层、高耸结构和大跨度结构, 风荷载引起的效应在总荷载效应中占有相当大的比重, 甚至起决定性作用, 因而风荷载及风荷载作用下结构的静、动力反应常常是高层、高耸及大跨结构研究的主要内容。目前我国的研究多是基于测压试验来进行^[1~4]。对高耸结构类的研究多集中于大跨越输电塔塔线耦合动力模型的研究; 对电视塔和其它类型高耸结构的研究也仅针对顺风向采用常用的Davenport 谱进行频域分析或采用风荷载模拟技术进行

时程分析而得到结构在风荷载作用下的动力反应^[5,6]。上世纪 90 年代以后随着风洞试验技术在实际工程中的大量应用, 风洞试验日益成为结构设计的一个重要工具, 一般适用于高层、超高层、复杂体型、大跨、高耸等结构^[7~9]。而对于一些较小的结构, 如图 1 所示的移动天线等, 通常的做法是直接在结构被测点位置贴应变片、传感器来获得有限的振动信号, 例如观测点的速度、加速度以及风速信号等, 利用这种方法分析结构的动力反应存在以下几个困难:(1) 现场作用于结构上的荷载很难确定, 特别是脉动风荷载;(2) 对结构的风荷载反应, 包括构件的内力、连接件的内力进行实测有时存在较大难度;(3) 由于脉动风荷载不能有效从现场实测中获得, 而依据《荷载设计规范》也难以得到动力

荷载时程,所以导致常规的有限元数值分析方法难以应用。

针对中国移动 TD-SCDMA 的第三代移动通信标准(简称 3G)天线面板进行研究,如图 1 所示。

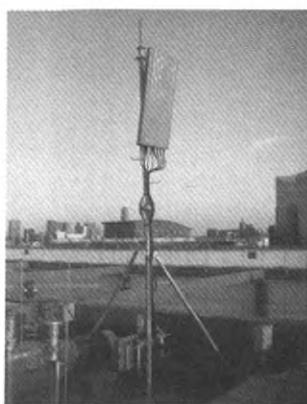


图 1 6 m 高的 3G 天线杆结构图

Fig. 1 Structural diagram of
3G antenna of 6m high

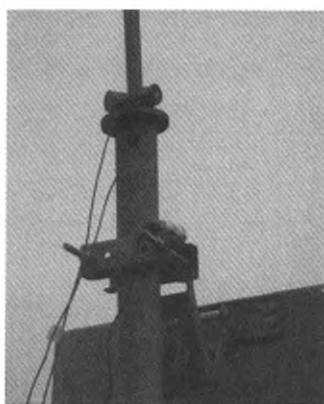


Fig. 2 The layout of
measuring points

这种天线杆结构一般都安装在城市高楼的顶端,因此对风荷载作用比较敏感,一旦在风荷载作用下失效,将会对通讯产生很大的影响。为了评估这些天线在风荷载作用下的动力反应,需要获得结构的各种力学指标,包括位移、应力、应变、轴力、弯矩等等。由于通讯的特殊性,这些天线一旦固定就不能随意拆卸,所以利用通常的做法很难完成。本文提出了一种现场实测的有限振动信号与结构有限元模型模拟分析相结合的方法来获得结构在实际风荷载作用下的动力反应全过程,可以得到结构内力,连接件内力,天线面板的加速度反应等全面的动力反应信息,也可以得到风荷载时程的定量估计。

1 风荷载作用下结构振动现场检测试验

首先采用环境激振的方法,用加速度传感器拾取天线杆结构测点的振动响应,然后经过动态信号分析

仪进行数据采集及分析,最后得到天线抱杆平行天线平板方面和垂直天线平板方向的自振频率和风振响应。

在数据分析过程中利用仪器所记录的结构反应加速度信号来确定结构的参数和动力特性,这样处理问题的好处是:第一符合真实的情况,第二可以提高信号处理中的信噪比,第三省时、省力,并且减少了工作量。

用数据信号分析仪,首先将所记录的模拟信号数字化,然后计算出信号的自谱、互谱、传递函数和相干函数等。

现场试验中采用了表 1 所示的传感器及放大记录设备。

表 1 试验中采用的仪器

Tab. 1 Apparatus used in experiment

仪器	测量范围	频率范围	质量
6153 型加速度传感器	$\pm 20 \text{ g}$	1 Hz ~ 100 Hz	100 g
DH610H 型速度传感器	$\pm 20 \text{ g}$	1 Hz ~ 1 000 Hz	800 g
信号分析仪数据采集分析系统	采用专用的振动信号分析仪,对试验采集到的电信号通过计算机进行自谱、互谱、相干函数、传递函数等分析运算		

测点布置在桅杆顶端,测试方向为垂直天线平面和平行天线平面,如图 2 所示。

图 3 ~ 图 6 为部分现场测试

得到的结构加速度时程曲线及其频谱曲线,现场实测风速为:7.8m/s。通过现场实测,该天线桅杆相对

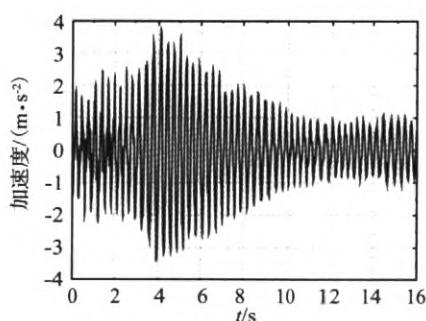


图 3 南北向加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history (NS)

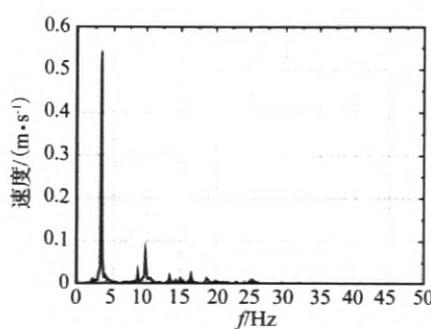


图 4 南北向频谱曲线

Fig. 4 Frequency spectrum curve (NS)

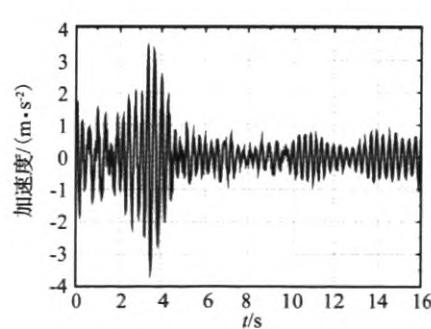


图 5 东西向加速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration time history (EW)

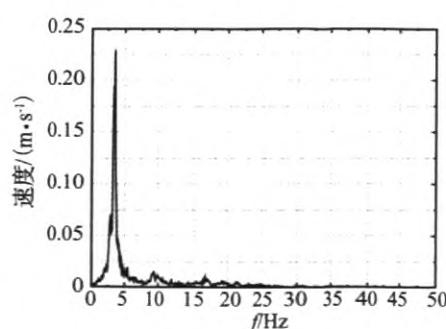


图 6 东西向频谱曲线

Fig. 6 Frequency spectrum curve (EW)

较高, 桅杆刚度相对较小, 从频谱图上可以得到该天线系统的基本自振频率约为 3.313 Hz, 二阶自振频率约为 3.563 Hz, 在风速为 4 m/s 至 12 m/s 范围内桅杆顶点位移约为 8 mm ~ 10 mm。

2 脉动风的模拟计算

2.1 有限元模型的建立

利用 ANSYS 建立天线结构的有限元模型, 如图 7 所示, 模型的参数取值参见文献[10]。

为了更好地研究风荷载作用下天线的工作状况, 对天线系统进行模态分析, 由于各阶模态中只有前几阶模态对振动起决定性作用, 故取前 8 阶的自振周期和自振频率, 如表 2 所示。

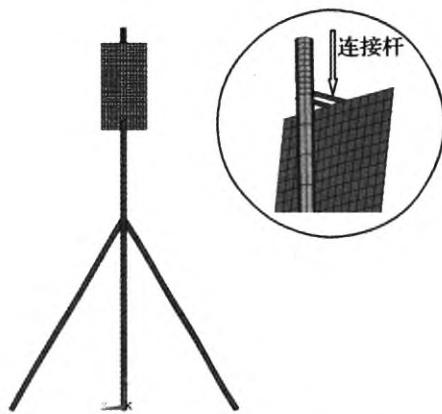


图 7 6 m 高三叉杆天线系统有限元模型

Fig. 7 Finite element model of tripodal antenna system of 6m high

表 2 前 8 阶自振周期和自振频率

Tab. 2 Natural vibration period and natural frequency of eighth order

振型	频率/Hz	周期/s	振型	频率/Hz	周期/s
1	3.837 9	0.260 559	5	23.815	0.041 99
2	4.009 3	0.249 42	6	27.833	0.035 929
3	21.742	0.045 994	7	31.296	0.031 953
4	23.605	0.042 364	8	37.989	0.026 323

从上表可以看出:一阶振型自振频率 $f = 3.837 9$ Hz, 二阶 $f = 4.009 3$ Hz, 三阶 $f = 21.742$ Hz, 三阶与二阶和一阶相差较大, 说明结构的响应主要以 1, 2 阶振型为主, 这与结构的形式有关, 从试验测得的频谱图中也可以看出。

由于在建立有限元模型时做了一些简化处理, 如: 原结构天线面板与抱杆是靠联接件连接, 而模型中只用了 2 根刚接杆代替, 这样势必忽略了结构联结件与面板之间的摩擦力等因素, 造成有限元模型与原结构存在一定误差, 如果要提高计算精度, 可以对模型做进

一步优化, 使其更符合原型, 其次, 试验过程中也存在一定误差。从计算结果看, 简化的模型与现场实测的结果基本吻合, 故该有限元模型可以用于模拟实际的天线结构系统。

2.2 脉动风荷载模拟的理论依据

对于顺风向, 风荷载由两部分组成, 一个是长周期分量的平均风, 可以视为静荷载作用在结构上, 另一部分是短周期分量的脉动风, 可以视为时间 t 的一个随机过程。

对于脉动风, 其强度是随时间 t 随机变化的, 由于它的周期较短, 其作用性质是动态的, 因而应按动力反应来分析, 本文采用多自由度体系来模拟脉动风荷载。

天线系统在风荷载作用下的运动方程为:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u(t)\} = \{P\} \quad (1)$$

其中 $\{P\}$ 为作用在天线面板上的实际风荷载, 它是位置向量 $\mathbf{d}(x, y)$ 和时间 $f(t)$ 的函数, 由于天线面板面积较小, 故假设风荷载压强在面板上每个点的分布均匀, 由此可以得出风荷载只是时间 t 的函数。

将位移 $\{u(t)\}$ 按振型展开, 即作正则坐标变换:

$$\{u\} = [\phi]\{q\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$[\mathbf{M}][\phi]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{C}][\phi]\{\dot{q}\} + [\mathbf{K}][\phi]\{q\} = \{P\} \quad (3)$$

前乘 $[\phi]^T$, 得到:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + C_n \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

M_n 、 C_n 、 K_n 、 P_n 分别为振型质量、正则阻尼系数、振型刚度和振型荷载。

对于风荷载作用下天线系统的振动, 由于结构较柔, 在脉动风作用下, 一阶振型的振动占主要部分, 因此可以采用一阶振型运动方程来简化模型, 其一阶振型坐标运动方程为:

$$M_1 \ddot{q}_1(t) + C_1 \dot{q}_1(t) + K_1 q_1(t) = P_1 \quad (5)$$

其中 M_1 为一阶振型质量, C_1 为一阶振型阻尼, K_1 为一阶振型刚度, q_1 为振型坐标, P_1 为一阶振型对应的振型荷载。

两边同时除以振型质量 M_1 , 并根据 $K_1/M_1 = \omega_1^2$, 上式可简化为:

$$\ddot{q}_1(t) + 2\xi_1\omega_1\dot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) = \frac{1}{M_1}P_1(t) \quad (6)$$

其中 ω_1 为天线一阶自振频率, 对于式(6), 通过现场实测可以得到天线系统中具有代表性的一点, 即桅杆顶端的一阶加速度时程曲线 $\ddot{q}_1(t)$, 利用下式变换:

$$\dot{q}_1(t) = \int_0^t \ddot{q}_1(t) dt \quad (7)$$

$$q_1(t) = \int_0^t \dot{q}_1(t) dt \quad (8)$$

可以分别得到体系中桅杆顶端的速度和位移时程曲线,如式(7)、式(8)所示,而 ω_1 可由有限元模态分析获得,忽略阻尼的影响,将式(8)和 ω_1 带入方程(6)中即可得到作用于天线面板上的模拟风荷载时程函数 $P_1(t)/M_1$ 。显而易见, $P_1(t)/M_1$ 与实际的风荷载相差一个系数 k 。

为了求系数 k ,首先将已经得到的模拟风荷载 $P_1(t)/M_1$ 施加到上面的有限元模型中,通过计算可以得到 $P_1(t)/M_1$ 作用下结构顶点的位移时程曲线 $u_1(t)$,对 $u_1(t)$ 做如下变换:

$$\ddot{u}_1(t) = \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} \quad (9)$$

即可得到模型计算的加速度时程,它与实测的 $\ddot{q}_1(t)$ 相差一个系数,由于结构假定为线弹性反应,所以此系数即是所求的系数 k 。

通过上面修正系数的方法可以得到与实测加速度时程相匹配的风荷载时程,同时也可以计算出天线连接件的内力反应时程。

2.3 未修正的脉动风荷载模拟结果

为验证本文所提方法的可行性和精度,通过现场

实测,可以得到不同测试工况下天线的加速度时程曲线,为了使问题更加具有代表性,本文选取两条曲线(工况1和工况2),其中工况1的风速为7.8 m/s,工况2的风速为7.2 m/s。

以工况2为例,可以得到模拟的风荷载时程曲线 $P_1(t)/M_1$,如图8所示,将该时程曲线施加到有限元模型中即可得到结构的加速度时程如图9所示。

其中加速度峰值为0.067 m/s²,而试验中实测的加速度时程如图12(a)所示,加速度峰值为1.96 m/s²,中间相差的系数 k 为29.3,将此系数乘以模拟的风荷载时程曲线 $P_1(t)/M_1$ 即可得到实际风速条件下的风荷载时程曲线,再将修正后的风荷载时程曲线施加到有限元模型中,进而求得结构的动力反应,如轴力、剪力等。

2.4 修正后的脉动风荷载模拟结果

图10~图13分别为实测的和有限元计算得出的加速度和位移时程曲线,通过加速度和位移时程曲线对比可以看出,模拟结果与实测结果十分接近。

同时也可以得到天线系统在脉动风荷载作用下连接件轴向力的动力反应时程曲线,如图14所示。

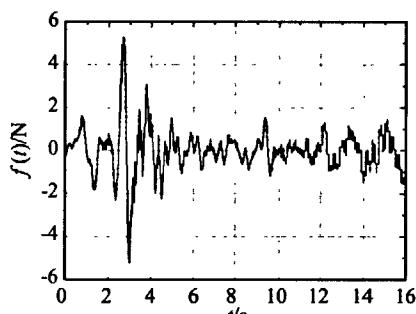
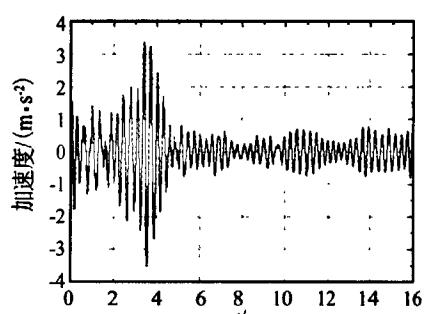
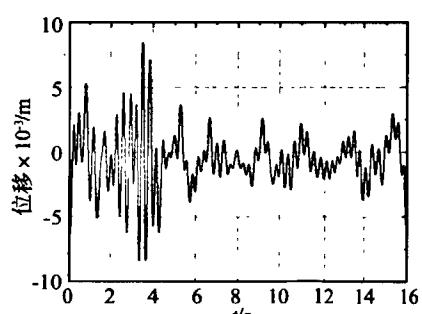


图8 模拟风荷载时程曲线(工况2)

Fig.8 Simulated wind loads history (case 2)



(a) 现场实测



(a) 现场实测

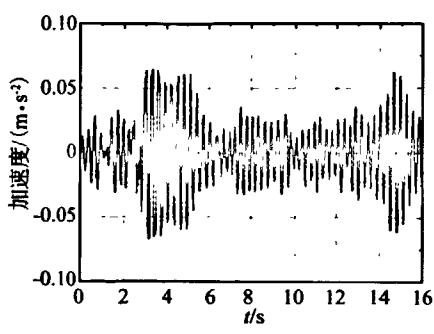
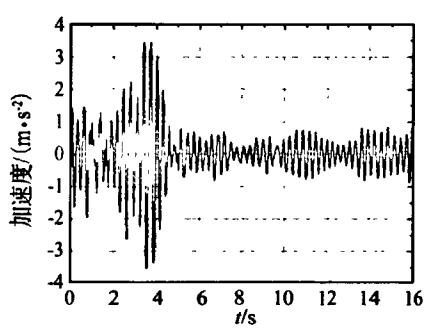
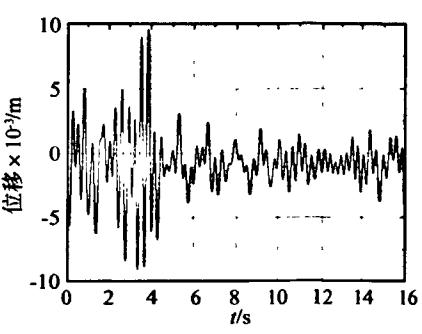


图9 模拟风荷载下的顶点加速度时程曲线(工况2)

Fig. 9 Top acceleration time history under simulated wind loads (case 2)



(b) 有限元模拟



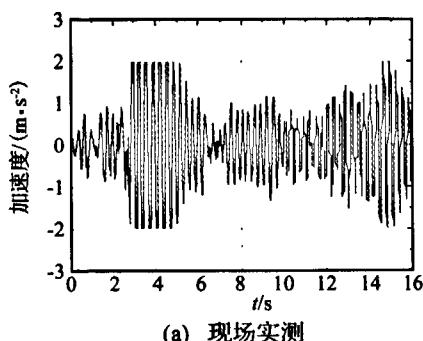
(b) 有限元模拟

图10 顶点加速度时程曲线(工况1)

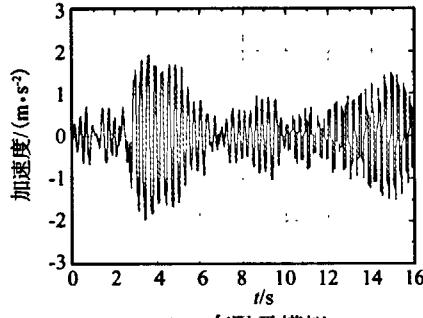
Fig. 10 Top acceleration time history (case 1)

图11 顶点加速度积分后的位移时程曲线(工况1)

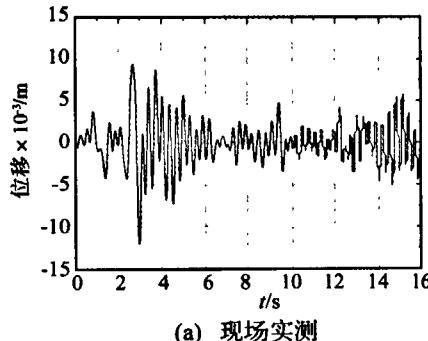
Fig. 11 Top displacement time history (case 1)



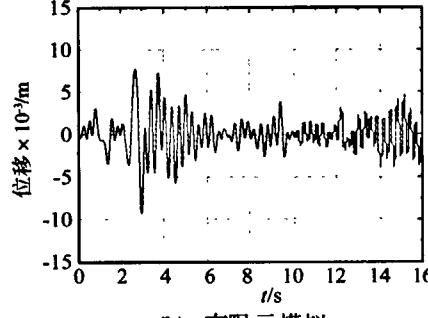
(a) 现场实测



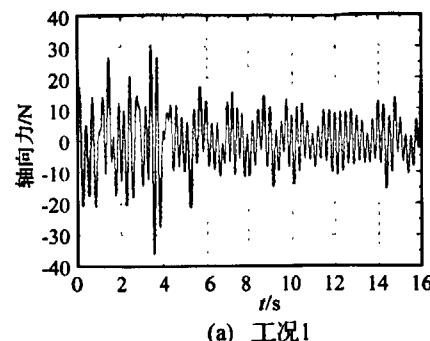
(b) 有限元模拟



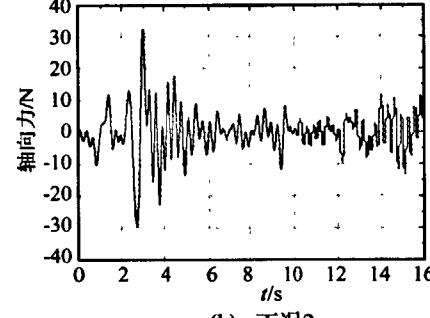
(a) 现场实测



(b) 有限元模拟



(a) 工况1



(b) 工况2

图 12 顶点加速度时程
曲线(工况 2)Fig. 12 Top acceleration time
history (case 2)图 13 顶点加速度积分后的位移
时程曲线(工况 2)Fig. 13 Top displacement time
history (case 2)图 14 连接件单根轴向力
时程曲线图Fig. 14 Axial forces history
for single rod

3 结 论

本文提出的结构动力反应分析方法不但减少了试验的工作量,没有影响到天线的正常工作,而且克服了脉动风荷载作用下结构现场检测试验方法存在的困难,从另一个角度提出了一种全新的简便方法来模拟风荷载,即结合现场实测的有限振动信号与结构有限元模型模拟分析的方法而获得结构在脉动风荷载作用下的内力,该方法需要首先测试结构在脉动风荷载作用下的有限振动信号,如:加速度时程和频谱曲线等,然后通过结构运动方程模拟出脉动风荷载时程并施加到结构有限元模型中,通过有限元计算求出模拟风荷载与实际风荷载之间的修正系数,最后把修正后的风荷载时程再次施加到有限元模型中从而得出结构在实际脉动风荷载作用下的内力。通过比较,有限元分析结果与实验结果吻合较好,该方法可以推广应用与其他类似的工程结构中。

参 考 文 献

[1] 禹慧. 复杂高耸结构风洞试验及风振响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

- [2] 顾明, 叶丰. 典型超高层建筑风荷载频域特性研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 30–36.
- [3] 顾明, 叶丰. 高层建筑风致响应和等效静力风荷载的特征[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 93–98.
- [4] 顾明, 叶丰. 高层建筑风致响应的简化分析方法[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 57–62.
- [5] 陈波, 翟伟廉. 高耸电视塔的动力特性及风振反应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(2): 23–26.
- [6] Cermak J E. Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 355–370.
- [7] Kasperski M. Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 527–541.
- [8] 楼文娟, 孙斌, 卢旦, 等. 复杂型体悬挑屋盖风荷载风洞试验与数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2008, 28(1): 107–112.
- [9] 许伟, 黄启明, 李庆祥, 等. 大跨度结构风荷载的风洞试验和CFD数值模拟研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(增刊): 394–401.
- [10] 刘晶波, 王宗纲, 费毕刚, 等. 中国移动 TD-SCDMA 天线安全性评估检测计算分析咨询报告[R]. 2009.

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>