

风力机叶片顺风向风致振动研究

金志昊 范宣华 苏先樾 陈璞

(北京大学力学与空天技术系暨湍流与复杂系统国家重点实验室,北京,100871)

摘要:借鉴桥梁和高楼建筑上已经广泛应用的风工程方法,在考虑脉动风的随机性的条件下,从频域和时域两个角度讨论了风力机叶片极限位移的计算方法。文中采用了Shinozuka提出的谐波叠加法从脉动风功率谱得到一组脉动风的时程样本。风力机的叶片被简化为变截面梁来考虑。将选定的脉动风功率谱以及相应的里程样本作用在叶片上,运用频域和时域两套方法对叶片进行了计算和分析,得到叶片的顺风向振动的平均位移和极限位移结果。结果表明,频域和时域两套方法得到的结果基本一致。将所提出的方法用于工程应用中,分析了暴风停机状态下的叶片极限位移最不利情况。最后指出本文的方法是一般性的,可用于风力机叶片与塔架的耦合分析。

关键词:风致振动;随机振动;谐波叠加法;风力机叶片

中图分类号:O324;O327 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)05-0677-05

Research on Blade Wind-Induced Vibration in Wind Direction

Jin Zhihao, Fan Xuanhua, Su Xianyue, Chen Pu

(State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems & Department of Mechanics and Aerospace Engineering, Peking University, Beijing, 100871, China)

Abstract: Referring to the method for the wind load problems in high-rise and bridge building, the computational method for the limit placement of wind turbine blade is discussed from both time domain and frequency domain. The harmonic superposition method proposed by Shinozuka is chosen to generate the fluctuating time-history wind samples. A blade is simplified to a variable cross-section beam. Both frequency domain method and time domain method are used to calculate the mean displacements and extreme displacements of blade in wind direction vibration. The strategy is applied to engineering to analyze the blade extreme displacement in storm. The results show that the proposed strategy for calculating the blade displacement is feasible. The proposed approach is of generality and can be employed to analyze other extreme displacement of wind turbines.

Key words: wind-induced vibration; random vibration; harmonic superposition method; wind turbine blade

中国风力发电业正在如火如荼地发展,相关的科学与技术问题也备受关注。对于风力发电机这种高耸的结构,特别是对于风力发电机叶片这种扁平状的、轻质的、柔性的迎风结构,顺风向的风致振动

是相当重要的振动形式。它影响到风力发电机工作的状态和安全性,也影响到风力发电机叶片的疲劳损伤和寿命预测。顺风向振动实际上是一种随时间变化且包含强烈脉动因素的风载荷作用下的随机

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714603)资助项目。

收稿日期:2011-04-29; **修订日期:**2011-07-30

通讯作者:陈璞,男,教授,1962年1月生,E-mail:chenpu@pku.edu.cn。

强迫振动。目前对于此类问题尚无系统的成熟的方法可以利用。

本文尝试利用在桥梁和建筑上已经广泛应用的方法,在考虑脉动风的随机性的条件下,从频域和时域两个角度估算风力机叶片以及风力机的极限位移。本文首先讨论了脉动风在频域与时域上的处理方法。在频域上直接用风功率谱获得位移功率谱,从而得到极限位移。而在时域上,在考虑竖向相关性的基础上将随机的风用谐波叠加法表示成时域上的风速,并用时程响应原振型叠加法求解动力学方程得到风力机叶片的时程曲线以及时程曲线的最大值。结果表明,时域分析和频域分析的极限位移远大于平均位移,即脉动风的影响尤其显著。一般地,频域分析的极限位移大于时域分析的最大位移,这符合频域分析结果是长程的统计性结果的特点。

1 风的模型

风的顺风向时程曲线中,通常包含两种成分:一种周期比较长,在10 min左右;另一种周期较短,一般只有几秒。两种成分周期差别很大。按照这种划分,风工程上通常把风分为平均风和脉动风两个部分来研究^[1]。平均风就是长周期的部分,一般认为在给定的时间段内,风速和方向不变。平均风对固有周期为数秒的建筑物的作用可以看成是一个拟静力过程。脉动风是短周期部分,是风的随机性的体现,随着时间的变化而不断变化,它的变化周期与建筑物固有周期是同一个量级。因此,对结构而言,脉动风的作用是一个动力过程。在一定的时间内,平均风的风速只与空间位置有关,而脉动风的风速与时间和空间都相关,两者叠加形成了风的空间和时间分布。

平均风的风速,可以利用大气层风速剖面来模拟。以下是常用的对数律^[2]

$$\frac{\bar{v}}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{h}{z_0} \quad (1)$$

式中: v_* 为剪切速度; z_0 为地面粗糙尺度,其物理意义为风速为0处的大气距离地表的高度; k 为冯卡门常数,一般取0.4。

将脉动风的风速的变化作为一个平稳正态随机过程来考虑,考虑 n 个空间点处的具有零均值的平稳随机过程,将各点的风速定义为 $v_j(t)$,其中 $j=$

1, 2, ..., n 。

其功率谱密度函数矩阵为

$$\mathbf{S}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中的对角项为各点的自功率谱密度,由已知的风速谱得到,非对角项为互功率谱密度,是各点脉动风的相干性的体现。

写成极坐标形式为

$$S_{xy}(\omega) = |S_{xy}(\omega)| e^{i\psi(\omega)} = \sqrt{S_{xx}(\omega) \cdot S_{yy}(\omega)} \cdot C(\omega) \cdot e^{i\psi(\omega)} \quad (3)$$

由于风的横向相干性远小于竖向相干性,一般情况只考虑竖向相干性,则相干系数 $C(\omega)$ 如下^[3]

$$C(\omega) = \exp\left(\frac{-\omega \cdot C_z |z_1 - z_2|}{\pi(\bar{v}_1 + \bar{v}_2)}\right) \quad (4)$$

式中, $|z_1 - z_2|$ 为两点竖向高度差,西缪曾经建议 $C_z = 10$ 。对于脉动风的模拟,1994年,王之宏基于Shinozuka于1971年提出的谐波叠加法^[4],将风速脉动作为平稳随机过程来处理,用一系列具有随机频率的余弦函数的和来模拟的脉动风速时程^[5]。这里利用此方法来得到脉动风的时程样本。

$$v_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |L_{jm}(\omega_l)| \cdot \sqrt{2\Delta\omega \cos[\omega_l \cdot t + \psi_{jm}(\omega_l) + \theta_{ml}]} \quad (5)$$

式中: ω 为圆频率; $\mathbf{L}(\omega)$ 为 $\mathbf{S}(\omega)$ 做乔列斯基分解后得到的下三角矩阵; t 为时间; N 为风谱频率的划分份数; $\Delta\omega$ 为频率增量; $\psi(\omega)$ 为两个不同点间互相干的相位角; θ 为一个0到 2π 之间均匀分布的随机数。

2 时域方法与频域方法

处理随机振动问题时,常常从时域和频域两个角度进行分析^[6-8]。这两种方法各有特点,时域法的思想比较直观,步骤清晰,考虑了结构的非线性因素,计算量相对比较大,可以得到详细的实时的响应结果。频域法充分考虑风的随机性特点,理论比较复杂,忽略了结构的非线性因素,计算上的代价也比较小,可以得到概率统计意义上的结果。下面就简要介绍这两种方法。

从结构的振动方程出发

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (6)$$

式中: M 为结构的质量矩阵; C 为结构的阻尼矩阵; K 为结构的刚度矩阵; \ddot{X}, \dot{X}, X 分别为脉动风荷载作用下,结点的加速度,速度和位移; $F(t)$ 为作用在结点上随时间变化的荷载。

设结构对质量矩阵归一化的振型矩阵是 $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$ (其中 n 是截断频率的个数),则有

$$\Phi^T K \Phi = \Omega^2 \quad (7)$$

式中 Ω 为由结构的前 n 阶圆频率组成的对角矩阵, $\Omega = \text{diag}[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 。

设 $X = \Phi Q$,进行振型分解,写为

$$\ddot{Q} + 2\xi\Omega\dot{Q} + \Omega^2 Q = \Phi^T F(t) \quad (8)$$

所谓时域,就是求解以上解耦的振动微分方程,得到时程位移结果。

而频域法则需要对式(8)两侧进行傅里叶变换,即从时域变换到频域,得到

$$Q(\omega) = H(\omega)\Phi^T F_{\text{fft}}(\omega) \quad (9)$$

式中,传递函数矩阵 $H(\omega) = \text{diag}[H_1(\omega), H_2(\omega), \dots, H_n(\omega)]$

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + i \cdot 2\xi_j \omega_j \omega} \quad (10)$$

$X(t)$ 的位移响应方差矩阵可以由式(11)得到

$$U = \Phi \int_{-\infty}^{+\infty} S_{QQ}(\omega) d\omega \Phi^T \quad (11)$$

代入 $Q(\omega)$ 可以得到。对于连续形式和离散形式两种情况可以对应为

$$U = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi H(\omega)\Phi^T F_{\text{fft}}(\omega) F_{\text{fft}}^T(\omega)\Phi H^*(\omega)\Phi^T d\omega = 2 \sum_{j=0}^{N/2} \Phi H(j\Delta\omega)\Phi^T F_{\text{fft}}(j\Delta\omega) \cdot F_{\text{fft}}^T(j\Delta\omega)\Phi H^*(j\Delta\omega)\Phi^T \Delta\omega \quad (12)$$

容易得到各个自由度标准差 σ ,就有极限位移响应结果如下

$$X_e = X_a + g\sigma \quad (13)$$

式中: X_a 为平均风荷载作用下的响应; g 为峰值因子,与风荷载的概率分布有关。

3 算例与工程应用

本文利用NH1500叶片作为分析的例子。NH1500叶片是南京航空航天大学为某风电企业设计的一个1.5 MW的大型水平轴风力机叶片,是典型的大型水平轴风力发电机叶片,其基本参数见表1,其详尽的几何及结构铺层、材料数据、设计参数、模态分析、屈曲分析等参见参考文献[9~12]。

表1 叶片基本参数

参数	数值
叶片长度/m	40.5
额定功率/kW	1 500
额定转速/(r · min ⁻¹)	17.2
额定风速/(m · s ⁻¹)	10
轮毂中心高度/m	65

根据叶片的形状和工作方式,选择用变截面的梁模型来模拟。根据叶片的铺层材料和几何的特点,模拟成由28段不同界面和材料的梁组成的变截面模型。这种模型可以代表叶片大部分的振动性质,并且计算量相对于壳模型来讲比较小。特别是进行谐波合成法模拟风速时程的计算时,梁模型的计算点比较少,计算量相对较小。

计算所采用的风的功率谱是《公路桥梁抗风设计指南》^[13]中推荐的考虑湍流尺度随高度变化的顺风向脉动风力谱,这是针对风机工作平面高度差比较明显的特点选取的^[14],形式如下

$$\frac{f \cdot S_{vv}(h, f)}{v_*^2} = \frac{200f_*}{(1 + 50f_*)^{\frac{5}{3}}} \quad (14)$$

$$f_* = \frac{f \cdot h}{\bar{v}(h)}$$

式中: v_* 为剪切速度; f 为频率; $\bar{v}(h)$ 为高度 h 处的平均风速。取轮毂高度65 m,地面粗糙度0.02,轮毂高度平均风速10 m/s,根据谐波叠加法,可以得到叶片模型上的脉动风的风速时程。图1给出了叶片旋转一周叶尖脉动风速时间历程。

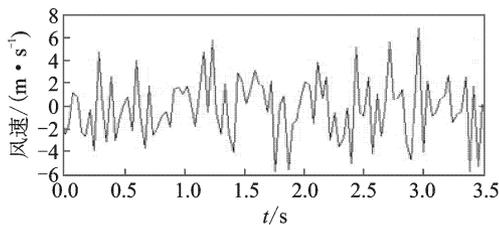


图1 叶尖脉动风速时程

利用风工程中传统的风速与风压关系,将风速转换为梁模型上的风压^[15]。由脉动风引起的为脉动风压,由平均风引起的为平均风压,两者叠加即为总风压

$$F = \bar{F} + F' = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{air}} A \cdot (\bar{v} + v')^2 \quad (15)$$

以上计算方法为航空机翼常用的压力换算方法。式中:体形系数 C_d 可以参考设计资料中的叶片翼型气动参数; ρ_{air} 为空气密度; A 为结构的挡风面积。

平均风压部分除了需考虑顺风方向的风所产生的风压之外,还要考虑叶片转动时相对风速引起的顺风方向的风压。

如图2所示,利用第2节所述的频域方法进行分析,可得平均风作用下的位移和考虑脉动风影响的极限位移。

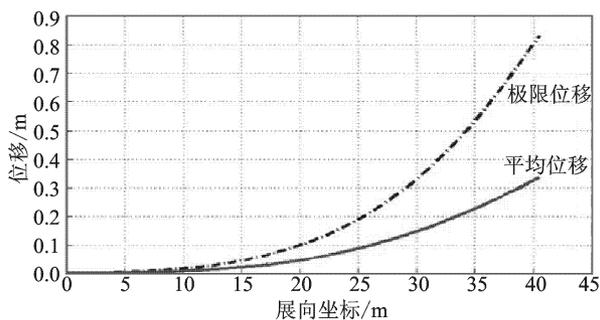


图2 极限位移与平均位移

以上为所得到极限位移与平均位移的对比,其中点划线为极限位移,实线为平均位移。这里取峰值因子 $g=3$,根据概率统计中正态分布函数的特点,有极限位移的置信概率为99.7%,即实际位移小于等于极限位移的概率为99.7%。

利用第2节所述的时域方法进行分析,所得到的结果就是梁模型的各个结点在取样时间段内在脉动荷载作用下的振动过程。图3为叶尖的时间-位移曲线。

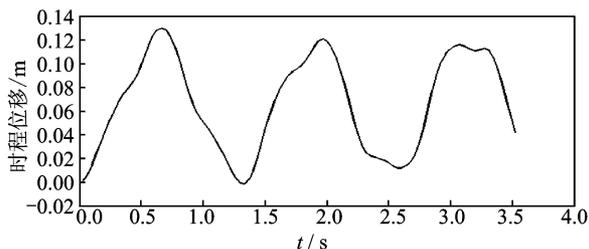


图3 叶尖时程响应分析结果

将各个点时程分析结果的最大位移取出来,可以得到整个叶片的最大位移情况,时域分析与频域分析的对比如图4所示,其中实线为频域分析得到的极限位移,虚线为时域分析得到的最大位移。图4表明,时域分析与频域分析的结果一致,两种方法都可以应用于风力机叶片极限位移的计算。

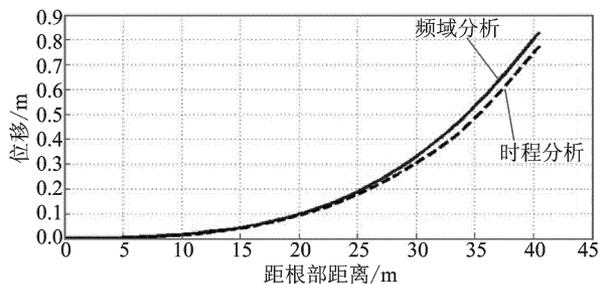


图4 时域分析与频域分析极限位移

在工程实际中,这里所讨论的方法主要用于最不利情况的估算。现在回归到风力发电机的具体工程实例中去,研究暴风状态叶片最不利情况。除此之外,本文的方法还可以用于讨论风机的悬挂距离和风轮仰角等。

所谓暴风状态下,即10 min内的平均风速大于设计的工作风速限制值。这种情况下,通常是由控制系统控制停机,将风轮转向来风方向,并且进行变桨距,使叶片与来风方向一致,即与工作平面成 90° 角,减少叶片上的压力和扭矩。在一般情况下,处于停机状态的叶片不会正面迎风。叶片此时主要受到气流漩涡脱落影响,产生横风向的振动。不过考虑到风向的实时偏转和风机偏航控制系统的反应时间,可能出现很短时间的叶片完全迎风的状态。笔者就可以应用第2节所述的方法进行估计,得到最不利情况下的叶片位移。

这里利用之前所用的时域和频域两种方法来计算的是平均风速达到30 m/s时(黑龙江省某地30年一遇的暴风^[16]),3 s内叶片的位移情况,其他各项计算参数与顺风向振动的计算参数相同。

图5中点划线为频域分析的极限位移,虚线为时程分析的最大位移,实线为平均位移。时域分析和频域分析的结果远大于平均位移,说明此工况下脉动风的影响尤其显著。频域分析的结果比时域分析的结果偏大,符合频域分析结果是长程的统计性结果的特点。而由于此工况下时间跨度比较短,时域分析的结果事实上是一个短程结果,最大的位移可能没有捕捉到。如果暴风条件的的时间跨度取得更长,时域结果会更加靠近频域结果。叶片在极端的暴风状态下位移有可能较大,这一点应该在设计时充分考虑。

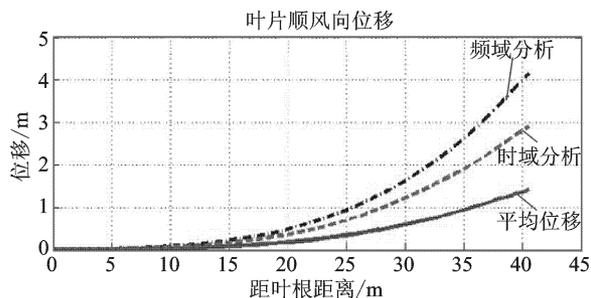


图5 频域分析结果、时域分析的平均位移与极限位移

4 结 论

本文借鉴土木与桥梁工程结构风致振动的处理方法,详细描述了解决风力发电机叶片顺风向风

致振动估算的原理和方法,并结合实际例子,计算了NH1500叶片的顺风向振动。在这一基础上结合具体工程问题,分析了暴风停机状态下叶片的最不利情况,以便于选取足够安全的悬挂距离和风轮仰角。可得到以下结论:

(1) 利用谐波叠加法合成的脉动风速时程的模拟方法可以得到比较合理的零均值的脉动风时程结果,只不过计算量比较大。

(2) 通过频域分析结果可以看出,置信概率为99.7%的极限位移大大超出平均位移,可见脉动风的影响很明显,不可以忽略,在风机叶片设计中应当予以认真的考虑和分析。

(3) 时域分析与频域分析这两种不同思路的方法所得的结果趋势一致,频域分析所得的极限位移结果略大。这说明两种分析方法的一致性,也佐证了频域分析结果的合理性。

(4) 在暴风状态下,即使是停机状态的风机叶片也有可能受到不利方向的阵风影响而产生很大变形,这是强度设计中需要考虑的因素。

(5) 在保证工作状态的叶片与塔架之间的安全距离方面,风轮仰角起着很明显的作,而其也影响着悬挂距离的取值。风轮仰角和悬挂距离这两个重要的参数都是风机总体设计时需要谨慎考虑的。

本文所运用的方法可以进一步结合叶片复合材料的疲劳损伤试验与理论,来对叶片的疲劳累计损伤问题进行分析,最终实现叶片的寿命的估计。此问题的解决依赖复合材料疲劳损伤实验的成功与否。风力发电机的风致振动问题的形式也是多种多样的,本文阐述的只是其中的一部分,还需要进一步的研究和探索,最好是能与实验和数值风洞相结合,结合工程实例提出行之有效的办法。

参考文献:

[1] 张相庭. 结构风压与风振计算[M]. 上海: 同济大学

出版社,1985.

- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范[S]. GB 50009—2001. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 米曦亮. 脉动风风速谱及空间相关性研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(6): 299-300.
- [4] Shinozuka M. Simulation of multivariate and multi-dimensional random processes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(1): 357-367.
- [5] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
- [6] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 田玉基, 杨庆山. 大跨度屋盖结构脉动风振响应的振型能量参与系数[J]. 振动工程学报, 2007, 20(3): 219-223.
- [8] 田玉基, 杨庆山. 国家体育场大跨度屋盖结构风振系数研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 26-31.
- [9] 南京航空航天大学. NH1500 叶片气动设计与性能校核[R]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [10] 南京航空航天大学. NH1500 叶片结构设计[R]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [11] 刘伟, 尹家聪, 陈璞, 等. 大型风力机复合材料叶片动态特性及气弹稳定性分析[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(3): 263-267.
- [12] 尹家聪, 刘伟. NH1500 风力机叶片有限元模态分析[R]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] 《公路桥梁抗风设计指南》编写组. 公路桥梁抗风设计指南[S]. JTG/TD60-01-2004. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [14] 苏成, 何涛. 集中常用风谱模型的对比研究[J]. 结构工程师, 2003 (z1): 260-264.
- [15] Murtagh P J, Basu B, Broderick B M. Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading[J]. Engineering Structure, 2005 (27): 1209-1219.
- [16] 王育光, 杜春英, 祖世亨, 等. 黑龙江省风能资源及其分布[J]. 黑龙江气象, 2005(4): 27.