

# 风力发电高塔系统抗风动力可靠度分析

贺广零, 李 杰

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 介绍一种基于广义概率密度演化理论的动力可靠度分析方法. 结合随机脉动风场物理模型和“桨叶-机舱-塔体-基础”一体化有限元模型, 分别分析 1.25 MW 风力发电钢塔和钢筋混凝土风力发电高塔的抗风动力可靠度. 研究表明, 广义概率密度演化方法可以有效地分析风力发电高塔系统抗风动力可靠度. 相比风力发电钢塔, 钢筋混凝土风力发电高塔具有更高的可靠度.

**关键词:** 风力发电钢塔; 钢筋混凝土风力发电高塔; 动力可靠度; 广义概率密度演化方法; 随机 Fourier 谱; 旋转 Fourier 谱

**中图分类号:** TK 83

**文献标识码:** A

## Dynamic Reliability Analysis of Wind Turbine Systems Subject to Wind Loads

HE Guangling, LI Jie

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The paper first presents a new dynamic reliability evaluation method based on generalized probability density evolution method (GPDEM). Then, the dynamic reliability of 1.25 MW steel wind turbine system and reinforced concrete wind turbine system is evaluated separately in combination with the physical model of stochastic wind field and the integrated finite element model consisting of the rotor, the nacelle, the tower and the foundation. The results show that the dynamic reliability of wind turbine systems can be worked out by the proposed method. Besides, the concrete wind turbine system is of a higher reliability than the steel one.

**Key words:** steel wind turbine system; reinforced concrete wind turbine system; dynamic reliability; generalized probability density evolution method; random Fourier

spectrum; rotational Fourier spectrum

开发风能是解决能源匮乏和环境污染两大基本问题的有效措施. 正因如此, 风能技术在国内外得到大力发展, 风电事业方兴未艾. 截止到 2008 年底, 世界风力发电机组总装机容量已达到 121 188 MW, 增长率为 29%. 其中, 中国装机容量达到 12 210 MW, 世界排名第四, 增长率为 107%, 居世界第一. 然而, 一片欣欣向荣景象背后的残酷现实是, 作为世界上的风能大国, 我国尚不具备独立开发风力发电高塔系统, 尤其是大型风力发电高塔系统的能力. 因此, 迫切需要建立正确评估风力发电高塔系统结构动力可靠度的分析方法, 并基于结构整体可靠度, 为风力发电高塔系统的结构设计、施工提供科学依据和支撑.

尽管已有学者对风力发电高塔系统抗风动力可靠度进行了初步探索, 然而这方面的文献还是较为罕见. Ronold 等基于一次可靠度分析方法, 以桨叶根部受拉破坏为失效模式, 研究桨叶(没有考虑其他构件的影响)在正常运行工况下的可靠度问题<sup>[1-3]</sup>. 本质上, Ronold 等是将动力模型的随机过程等效为静力模型的随机变量来分析结构可靠度的. 尽管这种简化方法在工程中获得广泛应用, 然而其等效过程必然导致精度下降和重要信息的缺失. Tarp-Johansen 等采用了相似的方法, 但考虑了更多随机因素的影响, 并将结构模型由风轮拓展至整个风力发电高塔系统<sup>[4]</sup>. 在结构动力可靠度分析领域, 基于首次超越破坏准则的结构动力可靠度分析已经取得了重要的进展, 形成了过程跨越分析方法和扩散过程理论方法<sup>[5-7]</sup>. 其中, 跨越分析方法得到了较为广泛的应用<sup>[8-9]</sup>, 风能技术亦为其中一例. 例如: Cheng

收稿日期: 2009-12-12

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体(50321803, 50621062); “十一五”国家科技支撑计划(200611A023); 上海市科委“登山行动计划”(06DZ12205); 上海市浦江人才计划(06PJ14095)

第一作者: 贺广零(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为结构工程. E-mail: hglcool@126.com

通讯作者: 李 杰(1957—), 男, “长江学者奖励计划”首批特聘教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为现代混凝土结构及生命线工程. E-mail: Lijie@tongji.edu.cn

提出了一种基于可靠度的近海风力发电高塔系统极值响应设计方法<sup>[10]</sup>. 该法本质上为随机模拟方法, 必然具有计算费用昂贵、随机收敛等诸多局限性. Veldkamp 所用方法相似, 但分析更为深入和全面, 且核心为风力发电高塔系统疲劳可靠度问题<sup>[11]</sup>. 总体上, 在基于过程跨越分析的动力可靠度计算中, 一般需对反应(效应)及其速度的联合概率分布作出假设, 进而对跨越过程的性质作出假定(如泊松假定或马尔可夫假定及其各种修正等)<sup>[7-8]</sup>. 由于通常的结构随机反应分析以结构反应的数值特征为主要目标, 缺乏对于结构反应概率信息的全面把握, 因此很难对这两个重要的环节作出根本的改进. 而基于 FPK 方程的扩散过程理论方法, 虽然原则上可给出更为精确的解答, 但目前仅能求解单自由度体系中的某些特殊情况.

近年来, 李杰和陈建兵从概率守恒原理的随机事件描述出发, 结合解耦的物理方程, 提出了广义概率密度演化方程<sup>[12-13]</sup>, 为人们获得任意时刻的随机动力系统反应的概率密度函数提供了有力的工具. 在此基础上, 他们基于吸收边界条件或者极值分布理论, 提出两类动力可靠度分析方法<sup>[14-17]</sup>; 通过严格证明等价极值事件原理, 发展了一类体系可靠度分析方法<sup>[18]</sup>. 为了实现该方法在风能技术领域中的应用, 笔者试图结合 1.25 MW 风力发电高塔系统, 分析此类结构的抗风动力可靠度, 为风力发电高塔系统动力可靠度评价提供技术范例.

## 1 广义概率密度演化方程

考虑一般多自由度结构体系的运动方程为

$$\mathbf{M}(\Theta)\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\Theta)\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{f}(\Theta, \mathbf{X}) = \mathbf{F}(\Theta, t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}(\Theta)$  为质量矩阵;  $\mathbf{C}(\Theta)$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{f}(\Theta, \mathbf{X})$  为恢复力向量;  $\mathbf{F}(\Theta, t)$  为外部激励向量; 基本随机变量  $\Theta = (\eta, \zeta) = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{s_1}; \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{s_2})$ ,  $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{s_1})$  为反映结构系统物理参数随机性的随机参数,  $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{s_2})$  为反映外部激励随机性的随机参数,  $s = s_1 + s_2$ , 为系统中随机变量的总个数;  $\mathbf{X}$  代表广义位移;  $t$  为时间.

通常, 工程实际中的大部分系统是适定的动力学系统, 对于此类系统, 其解答存在、唯一且连续依赖于系统参数和初始条件. 在此情况下, 对系统(1), 其解答  $\mathbf{X}(t)$  必依赖于  $\Theta$ , 不妨记为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{G}(\Theta, t) \quad (2)$$

相应的分量形式可表示为

$$X_l(t) = G_l(\Theta, t) \quad (3)$$

类似地, 其速度亦为  $\Theta$  的函数, 可记为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{H}(\Theta, t) \quad (4)$$

显然, 应存在  $\mathbf{H}(\Theta, t) = \frac{\partial \mathbf{G}(\Theta, t)}{\partial t}$ .

在工程实践中, 往往不仅关心结构的位移、速度和加速度反应, 还可能对诸如关键点的应力和应变、控制截面的内力和变形等其他物理量感兴趣. 一般来说, 这些物理量均可由结构的状态(速度和位移)确定<sup>[19]</sup>. 例如, 结构某点的应变可以通过位移的偏导数求得.

记  $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_q)^T$  为所需要考察的物理量, 则一般地有

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \phi[\mathbf{X}(t), \dot{\mathbf{X}}(t)] \quad (5)$$

式中,  $\phi(\cdot)$  是从状态向量向所考察物理量转化的算子, 对于线性结构体系, 为线性算子; 对非线性结构, 可能为线性算子, 也可能为非线性算子.

将式(2), (4)代入式(5), 有

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \phi[\mathbf{G}(\Theta, t), \mathbf{H}(\Theta, t)] = \mathbf{h}(\Theta, t) \quad (6)$$

由于  $\Theta$  的随机性, 这也是一个随机状态方程, 其分量形式可表示为

$$\dot{Z}_l(t) = h_l(\Theta, t); \quad l = 1, 2, \dots, q \quad (7)$$

记  $(\mathbf{Z}(t), \Theta)$  的联合概率函数为  $p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t)$ . 利用概率守恒原理的随机事件描述, 可导出<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^q \dot{Z}_j(\theta_j, t) \frac{\partial p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t)}{\partial z_j} = 0 \quad (8)$$

此即为广义概率密度演化方程. 特别地, 当  $q = 1$  时, 广义概率密度演化方程成为

$$\frac{\partial p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t)}{\partial t} + \dot{Z}(\boldsymbol{\theta}, t) \frac{\partial p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

在一般情况下, 方程(8)的边界条件可采用

$$p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t) \Big|_{z_j \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (10)$$

而初始条件则为

$$p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t) \Big|_{t=t_0} = \delta(z - z_0) p_{\Theta}(\boldsymbol{\theta}) \quad (11)$$

其中,  $z_0$  为确定性初始值.

通过求解广义概率密度演化方程, 可最终得到  $\mathbf{Z}(t)$  的概率密度函数

$$p_{\mathbf{Z}}(z, t) = \int p_{\mathbf{Z}\Theta}(z, \boldsymbol{\theta}, t) d\boldsymbol{\theta} \quad (12)$$

上述分析表明, 概率守恒原理建立了广义概率密度演化方程坚实的物理基础. 正是概率守恒原理的随机事件描述所提供的对随机事件分解观察的可

能性,导致了与物理系统解耦方程的自然结合,产生了广义概率密度演化方程.

## 2 结构动力可靠度分析

基于密度演化的基本思想,可以沿着两条途径获得结构动力可靠度——吸收边界法和极值分布法,进而结合等价极值事件原理,获得结构体系可靠度.

### 2.1 吸收边界法

采用首次超越破坏准则,则结构动力可靠度为

$$R(t) = \Pr\{Z(t) \in \Omega_s, t \in [0, T]\} \quad (13)$$

式中,  $\Omega_s$  为安全区域. 这意味着,在区间  $[0, T]$ , 物理量  $Z(t)$  所达区域不能向外穿越  $\Omega_s$  的边界  $\partial\Omega_s$ , 一旦外穿,则认为结构失效. 因此,一旦某个状态穿越了边界,则认为该状态不再返回安全区域. 从概率的意义上分析,意味着一旦结构失效,该事件“所携带”的概率即不再传回安全域内. 结合概率守恒与概率密度演化及系统物理演化关系的分析,可见由此导致广义概率密度演化方程的吸收边界条件为

$$p_{Z_\theta}(z, \theta, t) = 0, \quad z \in \Omega_s \quad (14)$$

在此吸收边界条件下求解广义概率密度演化方程,即可最终得到结构动力可靠度

$$R = \int_{\Omega_s} \tilde{p}_Z(z, t) dz \quad (15)$$

通过施加式(15)所示的吸收边界,就可以保证失效域内的概率不再传回安全域内. 这是因为,若失效域内的概率密度函数为0,从式(8)可知,第二项与演化速度相关的项为0,此时传回安全域内概率必为0. 因此,对给定的初始条件(11)、边界条件(14)求解概率密度演化方程(8),并根据方程(12),即可得到此时的“剩余概率密度函数”. 为区别起见,记为  $\tilde{p}_Z(z, t)$ ,而以  $p_Z(z, t)$  表示未施加吸收边界条件时的概率密度函数解答.

### 2.2 极值分布法

另一方面,当定义一个与失效准则相应的极值时,例如

$$Z_{\text{ext}}(T) = \text{ext}_{t \in [0, T]} Z(t) \Big|_{\Omega_s} \quad (16)$$

结构动力可靠度式(13)亦可采用如下等效方法计算:

$$R(t) = \Pr\{Z_{\text{ext}}(T) \in \Omega_s\} = \int_{\Omega_s} p_{Z_{\text{ext}}(T)}(z) dz \quad (17)$$

因此,只要能够获取极值分布,即  $Z_{\text{ext}}(T)$  的概率密度函数  $p_{Z_{\text{ext}}(T)}(z)$ ,即可通过一维积分式(17)得到结构动力可靠度. 事实上,式(17)的极值必然依赖于基本随机参数  $\Theta$ ,因之可以在形式上写为

$$Z_{\text{ext}}(T) = \text{ext}_{t \in [0, T]} Z(t) = W(\Theta, T) \quad (18)$$

不难看出,这实际上就是随机动力系统(2)的形式. 因此,可以采用推广的广义概率密度演化方程求解获得  $p_{Z_{\text{ext}}(T)}(z)$ ,进而通过积分式(17)获得结构的动力可靠度.

### 2.3 结构体系可靠度

进而,若考虑一个结构的体系可靠度问题,例如

$$R(t) = \Pr\{\bigoplus_{i=1}^m \{Z_i(t) \in \Omega_{s,i}, t \in [0, T_i]\}\} \quad (19)$$

式中,  $\bigoplus$  表示随机事件的并、交或其组合等逻辑运算;  $\Omega_{s,i}$  表示第  $i$  个随机事件的安全域. 类似地,可以构造一个等价的极值事件

$$Z_{\text{ext}}(T) = \text{ext}_{t \in [0, T_i], 1 \leq i \leq m} (\Xi) Z(t) \quad (20)$$

式中,  $(\Xi)Z(t)$  表示  $Z_i(t)$  经过一系列逻辑运算后的结果. 由此,可以采用推广的广义概率密度演化方程求解方法获得该等价极值的概率密度函数,并获得其体系可靠度

$$R = \int_{\Omega_s} p_{Z_{\text{ext}}}(z) dz \quad (21)$$

值得指出,在经典的基于跨越过程的结构动力可靠度分析中,需要过程及其导数的联合概率密度函数,以及关于跨越事件性质的假定构成分析中的基本难点;而在基于概率密度演化理论的结构动力可靠度分析中,并不出现这样的难点,也避免了基于后向 Kolmogorov 方程求解动力可靠度时对多维系统无法求解的困境.

## 3 风力发电高塔系统动力可靠度分析

### 3.1 结构模型

原模型是 1.25 MW 三桨叶变桨距风力发电高塔系统. 风轮直径为 64.35 m,桨叶宽度 1.50 m,深度 0.30 m. 在分析中,不妨将机舱及其内部构件视为一个整体,质量为 68.5 t. 为了比较钢塔和钢筋混凝土塔性能,分别对两种塔体建模. 其中,钢塔高 66.35 m,塔底直径 3.90 m,塔底厚度 0.02 m,塔顶直径 2.55 m,塔顶厚度 0.012 m,弹性模量 210 GPa,密度  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 钢筋混凝土塔高 66.35 m,塔底直径 3.90 m,塔底厚度 0.30 m,塔顶直径 2.55 m,塔顶厚度 0.20 m,塔身高度范围内的壁厚和直径按线性变化;混凝土标号 C30,弹性模量 30 GPa,泊松比 0.2;钢筋为 HRB335,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3. 塔底采用了  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$  的钢筋混凝土圆截面

筏基. 基础之下土体的泊松比 0.3, 重度  $21 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 剪切模量  $520 \text{ MPa}$ .

为了充分考虑风力发电高塔系统不同构件之间的相互耦合作用, 以大型通用有限元软件 ANSYS 为建模平台, 建立风力发电高塔系统“桨叶-机舱-塔体-基础”一体化有限元模型. 因桨叶和塔体一个方向的尺寸与另外两个方向的尺寸相差较大, 同时桨叶在工作状态下具有显著的应力刚化现象, 故桨叶和塔体都采用了能较好体现这些特征的 8 节点壳单元 (SHELL91). 在整体分析中, 不关注机舱及其内部构件的细部特征, 因此机舱及其内部构件可视为一个整体, 可借助梁单元 (BEAM189) 来模拟. 基础则采用钢筋混凝土实体单元 (SOLID65) 建立. 不同构件的结构尺寸、采用的单元类型不一样, 为了避免构件之间出现滑移, 采用多点约束单元 (MPC184) 来连接不同单元. 对钢筋混凝土风力发电高塔系统, 则采用复合壳单元 (SHELL181) 进行塔体有限元建模. 复合壳单元可模拟由多层复合材料所组成的结构, 定义该单元时需要给出每层材料的属性和厚度. 在应用该单元之前, 首先必须对钢筋混凝土风力发电高塔进行弥散分层处理. 为此, 将塔体沿壁厚方向分为 5 层, 即内外混凝土保护层、内外纵向受力钢筋层和两层钢筋之间的混凝土层. 混凝土层的厚度取实际厚度, 结构中离散的钢筋则按照面积等效原则弥散成厚度不变的钢筋层, 层与层之间按照实际结构顺序排列 (图 1). 风力发电高塔系统一体化有限元模型如图 2 所示, 依据效率与精度均衡的原则, 对风力发电钢塔和钢筋混凝土风力发电高塔分别划分了 1 098 和 1 608 个单元.

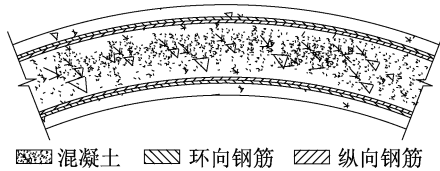


图 1 钢筋混凝土塔横截面分层图

Fig.1 Cross section of concrete wind turbine tower

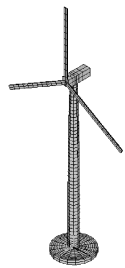


图 2 结构有限元分析模型

Fig.2 Finite element model

### 3.2 风场模拟及风荷载计算

风力发电高塔系统随机风场可分为桨叶随机风场和塔体随机风场两部分. 基于工程结构随机动力激励的物理建模思想<sup>[20]</sup>, 依据随机过程的随机函数描述, 塔体随机风场可用随机 Fourier 谱模型刻画<sup>[21]</sup>

$$F_u(n) = \frac{7.02 v_{10}^{4/5} n^{-1/3}}{\ln(10/z_0) [1 + 3.5 \times 10^4 (n/v_{10})^{9/5}]^{1/3}} \quad (22)$$

式中:  $n$  为频率;  $10 \text{ m}$  高度处平均风速  $v_{10}$  和地面粗糙度  $z_0$  为随机变量, 分别服从极值 I 型分布和对数正态分布. 结构场地条件为我国华东地区某市郊区的空旷场地, 由现场实测可知,  $v_{10} = 14.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[22]</sup>, 地面粗糙度可取为  $0.029 \text{ m}$ , 风剪系数  $\alpha$  应取为  $0.14$ <sup>[23]</sup>. 而在垂直平面上的任意两点之间的相关性则可以通过随机 Fourier 互谱来反映, 其表达式可以由两点处的随机 Fourier 谱与随机相干函数的乘积确定, 即

$$F_{ij}(n) = F_i(n) F_j(n) \gamma_{ij}(n) \quad (23)$$

式中,  $\gamma_{ij}(n)$  为相干函数. 因为风力发电高塔系统塔体为长细比较大的高耸结构, 故可忽略水平向风速的相关性,  $\gamma_{ij}(n)$  的表达式可简化

$$\gamma_{ij}(n) = C_1 \exp\left(-\frac{2nC_z(z_i - z_j)}{v(z_i) + v(z_j)}\right) \quad (24)$$

式中,  $v(z_i)$  和  $v(z_j)$  分别为高度在  $z_i$  和  $z_j$  的平均风速, 可按指数律由基准高度 (一般为  $10 \text{ m}$ ) 处平均风速换算得到; 常数项  $C_1$  和指数衰减系数  $C_z$  取均值, 分别为  $0.492$  和  $0.0302$ <sup>[22]</sup>.

相比较而言, 风力发电机桨叶风场还具有其特殊性: 桨叶上任意一点的空间位置随着桨叶旋转而不断变化, 导致作用于旋转桨叶的风场具有空间变化性. 总体上, 旋转桨叶风场具有时间、空间双重变化性. 为了考虑桨叶旋转效应, 宜用旋转 Fourier 谱模型描述桨叶风场<sup>[24]</sup>

$$F_{ii}(n) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} k_m(n - mn_0) F_{ii}(n - mn_0) \quad (25)$$

式中:  $k_m(n - mn_0)$  为相干函数的 Fourier 展开系数;  $n_0$  为桨叶旋转频率. 事实上, 旋转 Fourier 谱为作用在旋转桨叶上的风速时程经过 Fourier 变换所得, 是一种自身蕴含桨叶旋转效应的紊流风速谱. 图 3 给出了随机变量取定值时旋转 Fourier 谱与随机 Fourier 谱的比较. 相比较而言, 旋转 Fourier 谱的能量由低频向高频转移, 并在桨叶转动频率的整数倍处出现峰值. 由式 (25) 可知, 旋转 Fourier 谱  $F_{ii}(n)$

可由无穷多个随机 Fourier 谱  $F_{ii}(n)$  经过桨叶旋转频率  $n_0$  整数倍平移之后叠加而成. 这样, 就容易理解为什么旋转 Fourier 谱在旋转频率整数倍处会出现多峰现象.

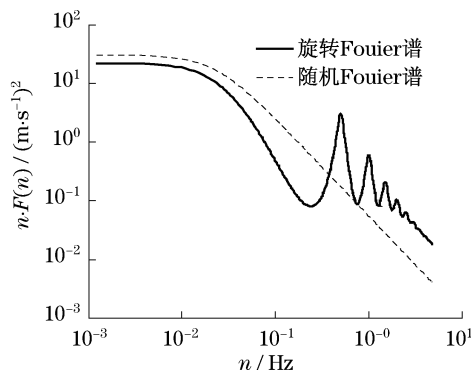


图 3 旋转 Fourier 谱与随机 Fourier 谱比较  
Fig.3 Comparison between the rotational and the random Fourier spectrum

为了考虑旋转桨叶上不同点风速之间的相关性, 可构建旋转 Fourier 互谱

$$F_{ij}(n) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{im\varphi} k'_m(n - mn_0) F_{ij}(n - mn_0) \quad (26)$$

值得注意的是, 桨叶上两点的脉动风速旋转 Fourier 互谱, 与塔体上两点的脉动风速随机 Fourier 互谱有本质的不同. 主要体现在两个方面: ①旋转 Fourier 互谱必须在旋转坐标系下考虑 2 点处脉动风速的相关性. 在旋转坐标系下, 两点的脉动风速互谱已经不能简单地通过各点脉动风速的自谱与相干函数的乘积来确定. ②旋转 Fourier 互谱体现了桨叶上(而非风轮平面上)任意两点的脉动风速之间的相关性. 因此, 旋转 Fourier 互谱可分为同一桨叶上两点之间的旋转 Fourier 互谱和不同桨叶上两点之间的旋转 Fourier 互谱.

依据随机函数法的基本思想<sup>[20]</sup>, 对上述两种随机 Fourier 谱模型逆 Fourier 变换, 即可得到相应的风速时程. 限于篇幅, 此处从略.

由于塔体为细长结构, 可依据细长结构风荷载计算方法<sup>[25]</sup> 确定作用在塔体上的风荷载. 一般来说, 桨叶结构异常复杂, 具体体现在两个方面: 截面形状持续变化, 截面扭角不断变化. 如何准确且简单地确定作用在复杂结构上的风荷载是个棘手的问题, 而该问题一直困扰着风工程界. 另一方面, 桨叶在旋转过程中会干扰风场, 减缓作用在结构上的风速. 基于此, 引入广泛认可的叶素动量 (blade

element momentum) 理论<sup>[26-27]</sup>, 以准确且简单地确定作用在桨叶上的风速, 并考虑旋转桨叶对风速的减缓作用.

### 3.3 抗风动力可靠度分析

基于广义概率密度演化方程, 以塔体强度、稳定性和正常使用性能为设计目标, 依据极值分布法, 分析风力发电高塔系统抗风动力可靠度. 一般可采用如下步骤:

步骤一, 概率空间选点与赋得概率确定. 在  $\Theta$  分布空间  $\Omega_\Theta$  中选取一系列的离散点  $\theta_q = (\theta_{q,1}, \theta_{q,2}, \dots, \theta_{q,s})$ ,  $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$  ( $n_{\text{sel}}$  为所取离散代表点的数目,  $s$  为随机变量数目), 同时确定每个代表点的赋得概率  $P_q = \int_{V_q} P_\Theta(\theta) d\theta$ ,  $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$  ( $V_q$  为代表性体积). 由于随机 Fourier 谱模型中有 2 个随机变量  $v_{10}$  和  $z_0$ , 故可采用切球选点法剖分概率空间<sup>[28]</sup>, 选点数  $n_{\text{sel}}$  取 109.

步骤二, 确定性动力响应求解. 对于给定的  $\Theta = \theta_q$ ,  $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$ , 求解物理方程 (1) 和 (6), 获得所需物理量的时间导数 (速度)  $\dot{Z}_j(\theta_q, t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

步骤三, 求解广义概率密度演化方程. 将第二步中的  $\dot{Z}_j(\theta_q, t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  代入方程 (8), 采用有限差分法求解该偏微分方程, 可获得其数值解.

步骤四, 累计求和. 将所有上步求得的  $p_{Z_\Theta}(z, \theta_q, t)$ ,  $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$  累计, 即可获  $p_Z(z, t)$  的数值解

$$p_Z(z, t) = \sum_{q=1}^{n_{\text{sel}}} p_{Z_\Theta}(z, \theta_q, t) \quad (27)$$

步骤五, 获取结构动力可靠度. 将  $p_Z(z, t)$  代入式 (17) 中, 一维积分后即可获取风力发电高塔系统动力可靠度.

由此可见, 风力发电高塔系统抗风动力可靠度的数值求解, 就是结合一系列的确定性动力响应的求解、一系列的广义概率密度演化方程的求解和一次概率密度函数的积分. 在上述步骤中, 除第二步借助通用有限元软件 ANSYS 以外, 其他步骤均通过 Matlab 软件和 C++ 软件编程实现. 按照上述步骤, 分别对风力发电钢塔和钢筋混凝土风力发电高塔进行抗风动力可靠度研究, 可得结果如下:

#### (1) 风力发电钢塔

依据 Germanischer Lloyd 规范<sup>[23]</sup>, 强度以 Mises 应力为代表, 稳定性由基底弯矩和轴力共同决定; 正常使用性能通常定义为桨叶在运行过程中不与塔体

接触.限于篇幅,本文只给出了正常使用性能指标的抗风动力可靠度分析,其他设计指标的抗风动力可靠度分析见参考文献[29].

为了确保风力发电高塔系统正常运行,必须分析正常使用性能,其中最重要的性能指标是桨叶在运行过程中不得与塔体碰撞.一般来说,这个指标可量化为桨叶运行到最低位置时叶尖与塔体的距离.显然,这个距离随着风力发电高塔系统的不同而各异.为了方便,通常将叶尖与塔体的距离转化为塔顶位移来分析.以风力发电钢塔风致随机动力响应分析为基础,可以获得塔顶位移真实极值分布与相同均值与标准差的常规分布,如瑞利(Rayleigh)分布、正态(Normal)分布和标准正态(Lognormal)分布之间的比较(图 4a),并进一步获得基于广义概率密度演化方法(PDEM)和基于 Monte Carlo 法(MCM)的动力可靠度比较(图 4b).不难发现,塔顶位移真实极值分布与上述常规分布显著不同:瑞利分布结果完全失真,而正态分布与对数正态分布的结果精度较差.同时,从本方法与 Monte Carlo 法结果的比较可见,无论是在高界限(高可靠度)还是在低阶限(底可靠度),本方法都具有良好的精度.这与基于跨越过程动力可靠度分析方法在 Poisson 跨越假定时仅在高界限具有较好的精度,而 Markov 假定则受制于反应过程的带宽,形成了鲜明的对比.值得强调的是,两种方法的效率却相差甚远.采用 Monte Carlo 法在 2.09 GHz CPU 和 2 G 内存的 PC 机上耗时 1 525.5 h,本方法仅需时 27.5 h.为了便于分析,表 1 给出了在不同阈值条件下的结构动力可靠度.不难发现,可靠度随着阈值的增加而不断降低.本文的风力发电高塔塔顶位移阈值为 1.5 m.由表 1 可知,可靠度为 0.996 9.值得说明的是,之所以此处结构动力可靠度仍然较高,是因为桨叶与塔体碰撞已然是非常极端的正常使用性能指标.事实上,远在桨叶与塔体碰撞之前,风力发电高塔系统已经无法正常运行.然而,除此性能指标之外,迄今还未有更为合理的性能指标去衡量因结构变形过大而引发的停机事件,故仍沿用此性能指标.由模态分析可知<sup>[29]</sup>,1.25 MW 风力发电钢塔系统为柔-柔结构,桨叶与塔体柔度都很大,在受力过程中变形较大,导致二者易于碰撞.这也正是此性能指标存在一定失效概率的原因.不可否认,柔-柔型风力发电钢塔系统具有很好的经济性,但是在使用性能方面也付出了相应的代价.

(2) 钢筋混凝土风力发电高塔

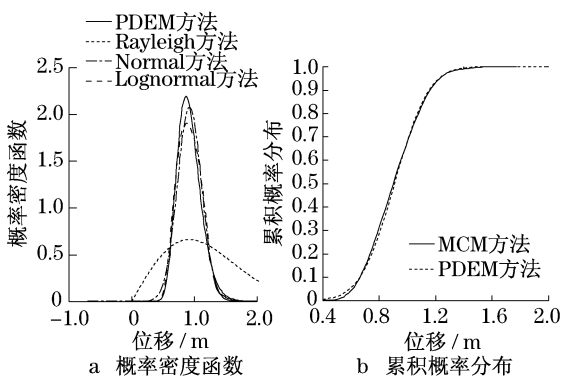


图 4 风力发电钢塔塔顶位移极值  
Fig.4 EVD of tower top displacement of steel wind turbine tower

表 1 不同阈值下的结构抗风动力可靠度(风力发电钢塔)  
Tab.1 Structural dynamic reliability of different thresholds (steel wind turbine tower)

塔顶位移阈值/m	抗风动力可靠度
0.9	0.493 5
1.1	0.828 2
1.3	0.977 4
1.5	0.996 9

风力发电钢塔已经在工程中获得广泛应用,但是钢筋混凝土风力发电高塔还未引起足够重视,故 Germanishcer Lloyd 规范<sup>[23]</sup>未对其详细规定.基于此,将结合 Germanishcer Lloyd 规范和《高耸结构设计规范》<sup>[30]</sup>确定分析目标.对于钢筋混凝土风力发电高塔而言,强度以混凝土抗压强度和钢筋抗拉强度为代表,极限承载力主要由基底弯矩确定;正常使用性能除确保桨叶与塔体不接触之外,还必须满足混凝土塔体开裂要求.限于篇幅,只针对塔顶位移进行随机动力响应分析,其他设计指标的动力可靠度分析见参考文献[29].相似地,可给出塔顶位移真实极值分布与相同均值与标准差的常规分布之间的比较(图 5a),以及基于广义概率密度演化方法和基于 Monte Carlo 法的动力可靠度比较(图 5b).为便于分析,表 2 给出了在不同阈值条件下的结构动力可靠度.不难发现,可靠度随着阈值的增加而不断提高.本文的钢筋混凝土风力发电高塔塔顶位移阈值为 0.8 m.由表 2 可知,结构动力可靠度为 1.显然,相比于风力发电钢塔,钢筋混凝土风力发电高塔具有更高的动力可靠度,原因是后者的刚度远大于前者.

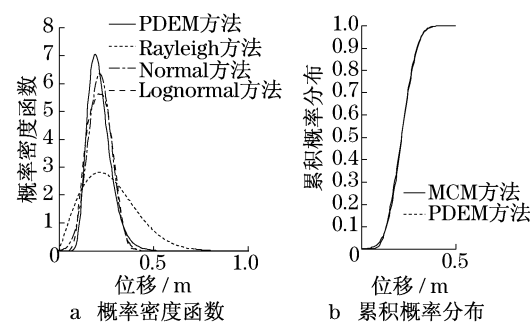


图 5 钢筋混凝土风力发电高塔塔顶位移极值  
Fig.5 EVD of tower top displacement of concrete wind turbine tower

表 2 不同阈值条件下的结构抗风动力可靠度  
Tab.2 Structural dynamic reliability of different thresholds (concrete wind turbine tower)

塔顶位移阈值/m	抗风动力可靠度
0.2	0.441 3
0.3	0.926 6
0.4	0.998 2
0.5	0.999 7
0.6	1.000 0

表 3 汇总了风力发电钢塔和钢筋混凝土风力发电高塔抗风动力可靠度分析结果. 总体上, 风力发电钢塔的各项指标都有较高的可靠度. 不难发现, 基于稳定性的抗风动力可靠度要小于基于强度的抗风动力可靠度. 在实际工程中, 风力发电钢塔失稳破坏的可能性确实要大于强度破坏的可能性<sup>[27]</sup>, 故而结构失稳是风力发电钢塔最为常见的失效模式. 对于钢筋混凝土风力发电高塔而言, 基于强度、基于基底弯矩和基于塔顶位移的可靠度均较高, 但是基于最大裂缝宽度的可靠度偏低. 因此, 钢筋混凝土风力发电高塔很难满足最大裂缝宽度的限制. 为此, 可考虑对钢筋施加预应力, 构造预应力钢筋混凝土风力发电高塔以满足混凝土开裂要求. 对于相同的设计指标 (如塔顶位移), 钢筋混凝土风力发电高塔的抗风动力可靠度要高于风力发电钢塔.

表 3 风力发电高塔系统抗风动力可靠度  
Tab.3 Dynamic reliability of wind turbine system under wind loads

风力发电钢塔	动力可靠度	钢筋混凝土风力发电高塔	动力可靠度
Mises 应力	0.958 8	基底弯矩	0.994 1
稳定性	0.930 0	塔顶位移	1.000 0
塔顶位移	0.997 0	裂缝宽度	0.450 9

4 结语

将广义概率密度演化理论应用于风力发电高塔系统抗风动力可靠度分析是行之有效的. 相比风力发电钢塔而言, 钢筋混凝土风力发电高塔具有更高的抗风动力可靠度. 但为了避免混凝土开裂, 推荐使用预应力钢筋混凝土风力发电高塔.

参考文献:

[1] Ronold K O, Larsen G C. Variability of extreme of flap loads during turbine operation [C]// 1999 European Wind Energy Conference; Wind Energy for the Next Millennium, Nice; James & James, 1999; 224 – 227.

[2] Ronold K O, Larsen G C. Reliability-based design of wind turbine rotor blades against failure in ultimate loading [J]. Engineering Structures, 2000, 22: 565.

[3] Ronold K O, Christensen C J. Optimization of a design code for wind-turbine rotor blades in fatigue [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 993.

[4] Tarp-Johansen N J, Madsen P H, Frandsen S. Partial safety factors in the 3rd edition. of IEC 61400 – 1: wind turbine generator systems-part 1: safety requirements[R]. [S. l.]: Riso National Laboratory, 2002.

[5] Crandall S H. First-crossing probabilities of the linear oscillator [J]. Journal of Sound and Vibration, 1970, 12: 285.

[6] 李桂青, 曹宏, 李秋胜, 等. 结构动力可靠性理论及其应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.

LI Guiqing, CAO Hong, LI Qiusheng, et al. Structural dynamic reliability theory and its application [M]. Beijing: Earthquake Publish Company, 1993.

[7] 朱位秋. 随机振动 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

ZHU Weiqiu. Random vibration [M]. Beijing: Science Press, 1998.

[8] Chen J J, Duan B Y, Zeng Y G. Study on dynamic reliability analysis of the structures with multidegree-of-freedom [J]. Computers and Structures, 1997, 62(5): 877.

[9] Kawano K, Venkataramana K. Dynamic response and reliability analysis of large offshore structures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 168: 255.

[10] Cheng P W. A reliability based design methodology for extreme response of offshore wind turbine [D]. Delft: Delft University of Technology. Wind Energy Research Institute, 2002.

[11] Veldkamp D. Chance in wind energy; a probabilistic approach to wind turbine fatigue design [D]. Delft: Delft University of Technology. Wind Energy Research Institute, 2006.

[12] 李杰, 陈建兵. 概率密度演化方程: 历史、进展与应用 [R]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2008.

LI Jie, CHEN Jianbing. Probability density evolution equation-history, development and application [R]. Shanghai: Tongji University. Department of Building Engineering, 2008.

[13] Li Jie, Chen J B. Stochastic dynamics of structures [M].

- Singapore: John Wiley & Sons, 2009.
- [14] Chen J B, Li J. Dynamic response and reliability analysis of nonlinear stochastic structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 33.
- [15] Chen J B, Li J. The extreme value distribution and dynamic reliability analysis of nonlinear stochastic structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(2): 275.
- [16] Chen J B, Li J. The extreme value distribution and dynamic reliability analysis of nonlinear structures with uncertain parameters [J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 77.
- [17] Chen J B, Li J. Development-process-of-nonlinearity-based reliability evaluation of structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2007, 22(3): 267.
- [18] Li J, Chen J B, Fan W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability [J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 112.
- [19] Fung Y C. A first course in continuum mechanics [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1994.
- [20] 李杰, 陈建兵. 随机振动理论与应用新进展 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- LI Jie, CHEN Jianbing. Advances in theory and applications of random vibration [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2009.
- [21] 李杰, 张琳琳. 实测风速资料的随机 Fourier 谱研究 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 66.
- LI Jie, ZHANG Linlin. Research on the random Fourier spectrum of observational wind [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(1): 66.
- [22] 张琳琳. 随机风场研究与高耸、高层结构抗风可靠性分析 [D]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2006.
- ZHANG Linlin. Research on wind stochastic field and analysis of dynamic reliability for high-rise building with wind loading [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Building Engineering, 2006.
- [23] Germanischer Lloyd. GL—2005 Rules and guidelines IV—industrial services, part 2—guideline for the certification of offshore wind turbines [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2005.
- [24] 贺广零, 李杰. 风力发电高塔系统基于物理机制的旋转 Fourier 谱 [R]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2008.
- HE Guangling, LI Jie. Rotational Fourier spectrum of wind turbine systems based on physical mechanisms [R]. Shanghai: Tongji University. Department of Building Engineering, 2008.
- [25] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering [M]. New York: John Wiley, 1978.
- [26] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- HE Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [27] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. Wind energy handbook [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- [28] Chen J B, Li J. Strategy for selecting representative points via tangent spheres in the probability density evolution method [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 74(13): 1988.
- [29] 贺广零. 风力发电高塔系统风致随机动力响应分析与抗风动力可靠度研究 [D]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2009.
- HE Guangling. Stochastic dynamic response and reliability analysis of wind turbine systems under wind loads [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Building Engineering, 2009.
- [30] 同济大学建筑工程系. GBJ135—90 高耸结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- Department of Building Engineering of Tongji University. GBJ135—90 Code for design of high-rising structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.