

文章编号: 1000-4750(2013)03-0395-07

近海风力发电高塔波浪动力可靠度分析

徐亚洲¹, 李 杰²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 采用基于广义概率密度演化方程的极值概率密度理论, 该文研究了近海风力发电高塔在随机波浪作用下的动力可靠度问题。波场由基于拟层流风波生成机制的随机 Fourier 海浪谱及线性波浪理论模拟, 确定性结构动力响应由有限元模型分析给出。结果表明: 采用极值概率密度理论可以方便地计算出不同阈值水平下塔顶侧移的动力可靠度, 采用经典的 Poisson 模型计算的可靠度随阈值水平的降低而误差增大。

关键词: 动力可靠度; 近海风力发电高塔; 概率密度演化; 随机 Fourier 海浪谱; Monte Carlo 抽样

中图分类号: P751 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0630

OCEAN DYNAMIC RELIABILITY ANALYSIS OF OFFSHORE WIND TURBINE TOWERS

XU Ya-zhou¹, LI Jie²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The probability density theory of an extreme event based on the generalized probability density evolution equation is employed to investigate the dynamic reliability of an offshore wind turbine tower subjected to wave loads. The wave field is simulated by using the linear water wave theory and stochastic Fourier spectrum of ocean waves which originates from quasi-laminar wind-wave generation mechanism. Deterministic structural responses are analyzed by the finite element method. The results indicate that the dynamic reliability of the top drift for the offshore wind turbine tower under different thresholds can be evaluated reasonably by the probability density theory of equivalent extreme events. The result of dynamic reliability according to a Poisson model exhibits a worse accuracy as the threshold decreases.

Key words: dynamic reliability; offshore wind turbine tower; probability density evolution method (PDEM); stochastic Fourier ocean wave spectrum; Monte Carlo sampling

近年来, 近海风力发电工业正在取得长足的进步与广泛的关注。与之相关, 关于近海风力发电高塔的运行安全问题也受到了普遍的重视。由此必然涉及风力发电高塔在风、浪、地震等灾害环境作用下的动力响应及可靠度分析问题。

海洋工程中经常遇到非线性问题, 如波浪力、系泊结构的响应等。此时, 即使输入是 Gaussian 过程, 输出也是非 Gaussian 过程。利用二阶随机

Volterra 级数考虑此类非 Gaussian 问题是一种常见的处理手段。在此框架内, Neal^[1]、Vinje^[2]、Naess^[3-6]等开展了一系列研究。Vinterstein 等采用 Volterra 级数模型研究了张拉腿平台(TLP)结构的极值及疲劳可靠度问题^[7]。基于 Sample-specific linearization 方法, Moarefzadeh 和 Melchers 研究了近海结构在风、波、流作用下的可靠度问题^[8]。Siddiqui 及 Ahmad 用一阶可靠度方法(FORM)研究

收稿日期: 2011-09-25; 修改日期: 2012-01-08

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体项目(50621062); 国家自然科学基金青年基金项目(51208410)

通讯作者: 徐亚洲(1978-), 男, 陕西榆林人, 副教授, 博士, 从事结构动力可靠度研究(E-mail: yazhou.xhu@gmail.com).

作者简介: 李 杰(1957-), 男, 河南开封人, 同济大学特聘教授, 博士, 主要从事随机力学与结构可靠度、混凝土结构、生命线工程抗震等方面的研究(E-mail: lijie@tongji.edu.cn).

了 TLP 结构在不同海况下的可靠度及失效概率^[9]。Naess 和 Karlsen 利用随机过程及其速度联合概率密度函数的特征函数表达穿越率,进而导出其联合特征函数的封闭形式,并采用最陡下降法给出穿越率的数值解^[10]。Moarefzadeh 和 Melchers 应用 Hermite 矩变换法研究了二阶非线性随机波浪及非 Gaussian 性对近海结构可靠度的影响^[11]。Naess 和 Gaidai(2007)利用二阶 Volterra 级数研究系泊结构在随机波浪作用下的慢漂响应,并给出了均值穿越率的渐进行为^[12]。

上述研究原则上都是基于响应的谱结构求取结构的可靠度。因此,在本质上属于近似方法。近年来发展的基于广义密度演化方程的结构随机动力分析方法^[13],为结构随机动力响应计算提供了新的途径^[14]。结合极值概率密度分布理论还可以实现结构的动力可靠度分析^[15-19]。本文采用基于广义概率密度演化方程的极值概率密度方法,研究近海风力发电高塔结构在随机波浪作用下的动力可靠度问题。

1 基于密度演化的极值概率密度理论

基于密度演化的基本思想,陈建兵、李杰发展了极值分析的密度演化方法^[20]。该方法通过构造虚拟随机过程建立关于极值函数(极值事件)的概率密度演化方程,采用数值方法求解极值事件的概率密度函数,在给定的安全界限内对其积分即可给出相应的动力可靠度。

1.1 极值分布的虚拟随机过程法

以首次超越破坏机制为准则,结构动力可靠度可以表示为^[20]:

$$R = P\{X(\tau) \in Q_S, \tau \in [0, T]\} \quad (1)$$

式中: $X(\tau)$ 为结构的响应; $P\{\cdot\}$ 表示概率; Q_S 为规定的安全域。

对于对称双侧界限问题,其等价形式为结构响应的绝对值 $|X(\tau)|$ 在 $[0, T]$ 的最大值处于安全域内的概率,即有:

$$R = P\left\{\max_{\tau \in [0, T]} (|X(\tau)|) < x_B\right\} \quad (2)$$

其中, x_B 为对称界限。

为了获得结构响应极值的概率分布,可以构造一个含有虚拟时间参数的随机过程,使得响应极值的概率分布等价于虚拟随机过程的截面随机变量,通过求解虚拟随机过程服从的概率密度演化方程,

即可获得结构响应的极值概率分布。

对于真实的随机动力系统,其响应极值必然是依赖于随机参数 Θ 的随机变量,即有:

$$Q = \max_{\tau \in [0, T]} (|X(\tau)|) = W(\Theta, T) \quad (3)$$

构造以 τ 为虚拟时间变量的随机过程:

$$Z(\tau) = Q \cdot \tau = W(\Theta, T) \cdot \tau \quad (4)$$

容易发现,当 $\tau = 1$ 时,虚拟随机过程即等价于待求的极值事件:

$$Q = Z(\tau)|_{\tau=1} \quad (5)$$

注意到

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = W(\Theta, T) \quad (6)$$

利用概率守恒原理,可知极值函数与随机参数的联合概率密度函数满足^[20]:

$$\frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)}{\partial \tau} + W(\Theta, T) \frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

相应的初始条件为:

$$p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)|_{\tau=0} = \delta(z) p_{\Theta}(\theta) \quad (8)$$

采用差分法求解概率密度演化方程可获得 $p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)$, 对随机参数 Θ 积分可得:

$$p_Z(z, \tau) = \int_{\Omega_{\Theta}} p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau) d\theta \quad (9)$$

根据虚拟随机过程的定义可知:

$$p_Q(q) = p_Z(z = q, \tau = 1) \quad (10)$$

此即为响应极值的概率密度函数。对其在规定的安全域内积分即可获得相应的动力可靠度。以对称双侧界限为例,动力可靠度为:

$$R = \int_{-x_B}^{x_B} p_Q(q) dq \quad (11)$$

1.2 数值方法

采用 Lax-Wendroff 格式对 z 和 τ 进行离散可以获得概率密度函数的数值解及动力可靠度,详细步骤为^[19]:

1) 采用数论选点法离散随机变量空间,获得点集 $\Theta_p = \{\Theta_{1,p}, \Theta_{2,p}, \dots, \Theta_{s,p}\}$, $p = 1, 2, \dots, N_{sel}$ 为随机变量的离散点数目。

2) 将 Θ_p 代入结构运动方程中求解确定性反应(本文通过编制程序生成波浪力样本集,施加于有限元模型获得相应的结构响应)。

3) 利用确定性响应的极值构造结构响应极值的虚拟随机过程 Z 。

4) 利用响应极值的广义密度演化方程,采用差分法求解联合概率密度函数 $p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)$, 其 Lax-Wendroff 格式为:

$$p_j^{(k+1)} = p_j^{(k)} - \frac{\delta w}{2} [p_{j+1}^{(k)} - p_{j-1}^{(k)}] + \frac{\delta^2 w^2}{2} [p_{j+1}^{(k)} + p_{j-1}^{(k)} - 2p_j^{(k)}] \quad (12)$$

其中, $p_j^{(k)}$ 指的是差分网格中时间节点 k 、极值响应节点 j 的联合概率密度函数 $p_{z\theta}(z, \theta, \tau)$ 的值。网格比 $\delta = \Delta\tau / \Delta z$, 需要满足 CFL 稳定性条件。

5) 将 $p_{z\theta}(z, \theta, \tau)$ 在基本随机变量空间中积分并取 $\tau = 1$, 即可得到结构响应极值的概率密度函数 $p_Q(q)$ 。

6) 按照定义即可由 $p_Q(q)$ 积分获得其动力可靠度:

$$R = \int_{-x_B}^{x_B} p_Q(q) dq \quad (13)$$

2 随机海浪模拟

近海风力发电塔的波浪力可采用 Morison 公式计算。Morison 公式中的水质点速度和加速度根据线性波浪理论由波面对时间求导获得, 本文采用基于拟层流风波生成机制的随机 Fourier 海浪谱模拟波面。

2.1 随机 Fourier 海浪谱

迄今为止, 拟层流风波生成机制是风波生成机制研究中重要的理论模型^[21-23]。基于此可以通过海浪过程的能量密度与风-波相互作用能量传递之间的关系建立随机 Fourier 海浪谱^[24]:

$$F(\omega, \zeta) = \sqrt{\frac{\rho_a}{2\rho_w g^2}} U \cdot \beta(\tilde{\omega})^{1/2} \cdot (\tilde{\omega})^{3/2} \cdot A(\tilde{\omega}) \cdot \frac{1}{\gamma^2} \exp(-(\omega - \omega_p)^2 / (2\sigma^2 \omega_p^2)) \quad (14)$$

其中: $\tilde{\omega} = \mu\omega / \omega_p$, ω_p 为谱峰频率, μ 是谱峰频率调整系数; $\beta(\tilde{\omega})$ 是能量传递系数, 其计算方法可见文献[21, 23-24]; $A(\tilde{\omega})$ 为波幅; U 为等效风速; ρ_a 为空气密度; ρ_w 是水密度; g 为重力加速度。以下介绍等效风速和谐波振幅的计算方法。

2.1.1 等效风速 U

对应于无限风时与风距的充分成长海浪谱, 根据有效波高 H_s 和 10m 高风速之间的实测统计结果可确定等效风速:

$$U = \sqrt{59.367 H_s} \quad (15)$$

其中, H_s 为波列中最大 1/3 波高的算术平均值。

2.1.2 谐波振幅 $A(\tilde{\omega})$

与频率有关的谐波振幅由等效风速与平均波

高的统计关系及放大因子 λ 确定。平均波高 \bar{H} 与平均周期 \bar{T} 及 10m 高风速 U 之间存在如下关系^[22]:

$$\begin{cases} \bar{H} = 0.059 \bar{T}^2, & \bar{T} < 0.32U \\ \bar{H} = 0.019 U \bar{T}, & \bar{T} > 0.32U \end{cases} \quad (16)$$

式中, 平均周期 \bar{T} 与每一谐波的圆频率 $\tilde{\omega}$ 满足 $\tilde{\omega} = 2\pi / \bar{T}$ 。谐波振幅等于平均波高与放大因子的乘积, 即:

$$A = \lambda \bar{H} \quad (17)$$

λ 与风速 U 之间的关系为:

$$\lambda = 1.071 + 0.211U \quad (18)$$

图 1 和图 2 分别为算例采用的随机 Fourier 谱均值和集合功率谱与相应实测值的比较^[24]。

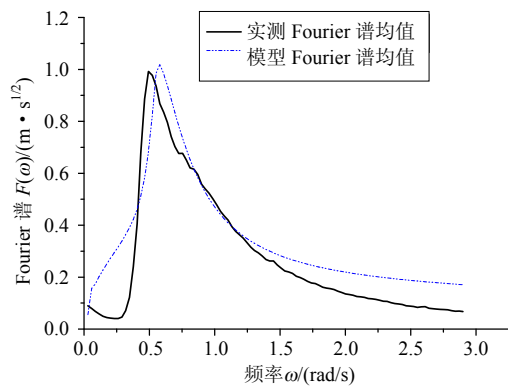


图 1 随机 Fourier 谱均值

Fig.1 Comparison of mean of the stochastic Fourier spectrum and record

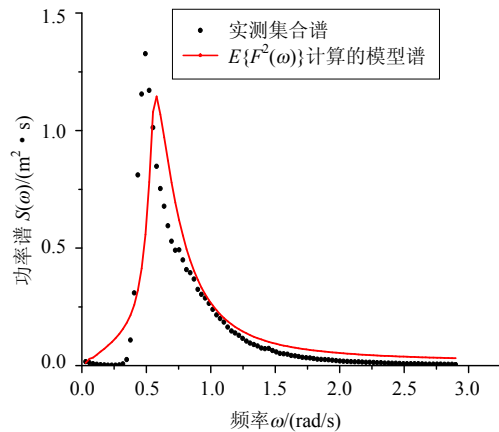


图 2 实测样本集合功率谱与按随机 Fourier 模型计算的功率谱比较

Fig.2 Comparison of the ensemble power spectrum and present model

2.2 随机波面生成

随机 Fourier 海浪谱中基本随机变量的分布类型及特征参数可由实测记录识别给出^[24]。此处 6 个随机变量如用简单 Monte Carlo 抽样法则需要大量的样本点, 导致计算量较大, 可以考虑拟 Monte

Carlo 等降低抽样数目的改进方法。而数论选点法是一种加权离散概率空间的方法, 由于各个样本点的权重不同故可以较少点数获得适当的精度。基于多维随机变量概率空间的数论选点法^[25]在随机 Fourier 海浪谱的六维随机变量空间中进行选点, 共计 360 个。

本文采用的模型参数及其均值与按照赋得概率(权值)计算的均值见表 1, 相应的随机 Fourier 谱均值见图 1, 集合功率谱见图 2。

表 1 随机 Fourier 谱参数均值与赋得概率计算的均值
Table 1 Mean of the stochastic Fourier spectrum and mean calculated by the given probability

参数	有效波高 H_s	谱峰频率 ω_p	谱峰值调整系数 γ	谱峰频率调整系数 μ	谱形参数 σ_L	谱形参数 σ_R
模型	2.68	0.57	7.91	1.62	0.24	0.73
计算	2.68	0.57	7.95	1.62	0.24	0.76

基于随机 Fourier 谱与集合功率谱的关系^[26], 并考虑相位由随机初相位和相位差谱确定, 随机波面可以表示为:

$$\eta(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2\Delta\omega} F(\omega_j) \cos(\omega_j t + \varphi_{0j} + \sum \Delta\varphi_j) \quad (19)$$

其中: N 为离散点数目; φ_{0j} 为随机初相位; $\Delta\varphi_j$ 为相位差谱; $F(\omega_j)$ 为随机 Fourier 谱值。

直接利用 Matlab 软件包在 $[0, 2\pi]$ 内抽取 360 个随机初相位 φ_{0j} 以及相位差谱 $\Delta\varphi_j$, 结果见图 3、图 4。

3 近海风力发电高塔结构分析模型

3.1 随机波浪力

与所考虑的海况相比, 近海风力发电高塔通常可视作小尺度结构物, 对波场的影响一般并不显著, 采用 Morison 公式^[27]计算波浪力是合理的。作用在单位长度直立圆柱上的波浪力为:

$$f(t) = \frac{1}{2} C_D \rho D u_x |u_x| + \frac{1}{4} C_M \rho \pi D^2 \dot{u}_x \quad (20)$$

其中: D 为塔身直径; 拖曳力系数 $C_D = 1$; 质量系数 $C_M = 2$; ρ 为海水密度; u_x 为质点水平速度; \dot{u}_x 为质点水平加速度, 由选用的波浪理论确定。本文采用线性波浪理论, 所以:

$$u_x = \sum_{j=1}^N \frac{\cosh k_j(z+d)}{\cosh k_j d} \frac{gk_j}{\omega_j} \sqrt{2\Delta\omega} F(\omega_j) \cdot \cos(\omega_j t + \varphi_{0j} + \sum \Delta\varphi_j) \quad (21)$$

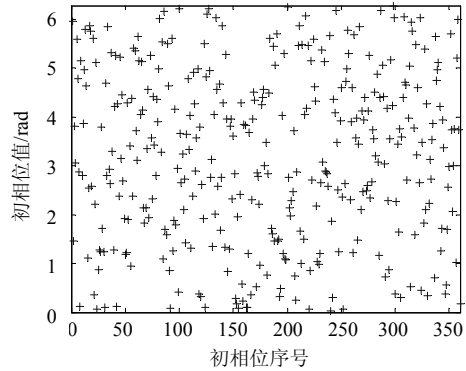


图 3 360 个样本的随机初相位
Fig.3 360 random initial phases

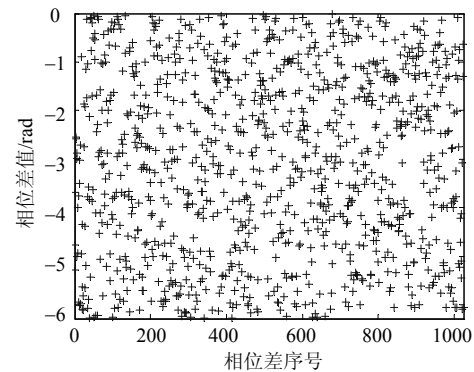


图 4 随机海浪相位差分布
Fig.4 Phase difference distribution of stochastic sea waves

$$\dot{u}_x = - \sum_{j=1}^N \frac{gk_j \cosh k_j(z+d)}{\cosh k_j d} \sqrt{2\Delta\omega} F(\omega_j) \cdot \sin(\omega_j t + \varphi_{0j} + \sum \Delta\varphi_j) \quad (22)$$

式中: d 为水深; k_j 为第 j 个谐波分量的波数; $F(\omega_j)$ 由前述随机 Fourier 海浪谱确定, 随机初相位和相位差利用 Matlab 直接生成。

由此, 根据随机 Fourier 海浪谱确定的波面即可计算出单位长度直立圆柱上作用的随机波浪力, 数论选点法及 Monte Carlo 法计算的静水面处波浪力的标准差见图 5, 二者吻合良好。波浪力时程作为

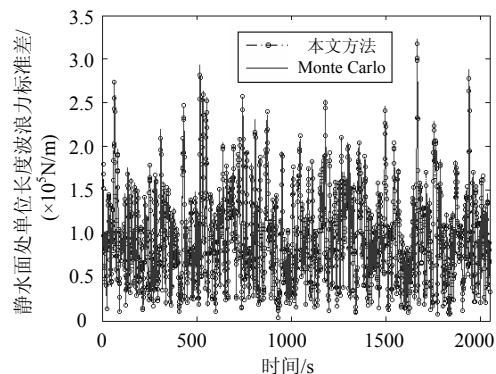


图 5 静水面处波浪力标准差
Fig.5 Standard deviation of wave forces at still water surface

节点力施加于有限元模型，在波浪力的计算中忽略了结构与流体质点相互作用的影响。

3.2 有限元模型

近海风力发电高塔结构下部承受波浪作用，上部支撑桨叶等设备(图 6)。对其进行有限元建模时，考虑底部固结，忽略桨叶-塔身相互作用、桩-土相互作用等因素的影响，机舱、设备及桨叶质量均匀分布于塔顶。塔高 64.65m，塔身采用壳单元 S4R，桨叶和设备质量共计 81.462t。塔身钢材弹性模量为 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ ，阻尼比取为 1%。结构一阶和二阶振型为两个主方向的平动振型，三阶和四阶为方向相反的扭转振型，其他各阶类似。故此处只给出两个相似振型中的一个示意，但结构响应分析时均考虑在内。前五个奇数阶频率见表 2，相应的模式示意图见图 7，波浪力按前述方法计算。

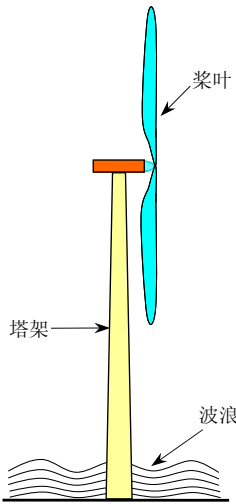


图 6 近海风力发电高塔架模型

Fig.6 Schematic of an offshore wind turbine

表 2 模型基本动力特性

Table 2 Dynamic properties of the FEM model

模态阶数	1	3	5	7	9
频率/Hz	0.429	0.879	1.687	2.714	3.604

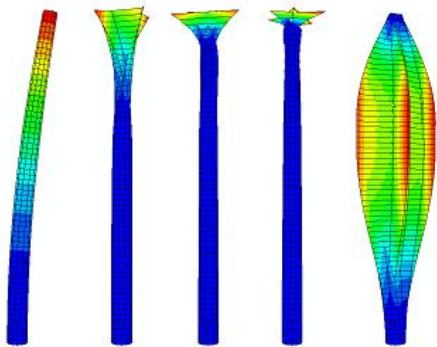


图 7 前 5 个奇数阶模态示意图(由左向右)

Fig.7 Five odd mode shapes (from left to right)

4 塔顶侧移动力可靠度分析

4.1 基于极值概率密度理论的动力可靠度分析

如前所述，首先利用有限元模型计算出确定性塔顶侧移时程样本，通过概率密度演化方法^[13]计算的标准差见图 8。其中还给出了 Monte Carlo 模拟的结果，二者吻合良好。此外，塔顶侧移标准差表现出明显的时变性，不宜作为平稳过程处理。

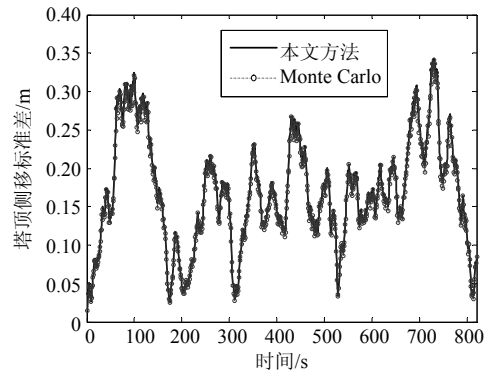


图 8 塔顶侧移标准差

Fig.8 Standard deviation of the drift at the top of the tower

进而，通过虚拟随机过程计算得等价极值事件的概率密度函数或累积概率分布函数。其中，累积概率分布函数是概率密度函数的积分。在给定的阈值范围对等价极值事件的概率密度函数积分，或者取阈值界限对应的累积概率分布函数值之差即为待求动力可靠度。动力可靠度与等价极值事件概率密度函数、累积概率分布函数之间关系的示意图见图 9。具体算例分析结果见 4.3 节。

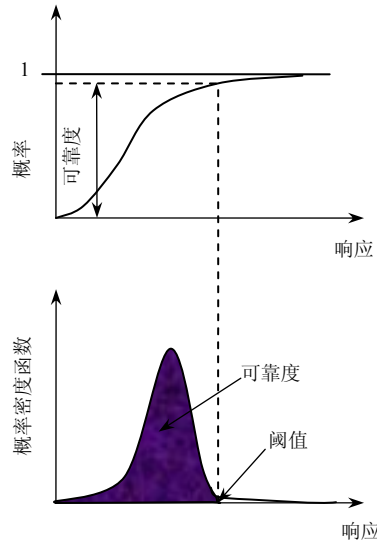


图 9 等价极值事件概率密度函数、累积概率密度函数与动力可靠度之间关系的示意图

Fig.9 Schematic of the relationship between dynamic reliability, cumulative probability distribution function and probability density function

4.2 基于 Poisson 模型的动力可靠度分析

如假定响应与界限相交的首次跨越事件服从 Poisson 分布, 即采用 Poisson 模型计算基于首次跨越失效机制的动力可靠度, 对称双侧限时的动力可靠度为^[28-29]:

$$R(-b, b) = \exp \left[- \int_0^T \frac{\sigma_{\dot{X}}}{\pi \sigma_X} \exp \left(- \frac{b^2}{2\sigma_X^2} \right) dt \right] \quad (23)$$

其中: b 为给定的界限值; σ_X 为响应的标准差; $\sigma_{\dot{X}}$ 为响应变化率的标准差; T 为响应的持时。

4.3 动力可靠度分析结果

近海风力发电高塔一个重要的运行极限状态即是塔顶侧移的限制, 通常由气动分析给出阈值。采用极值概率密度理论分析算例塔顶侧移的动力可靠度需要构造出相应的等价极值事件。图 10 和图 11 分别为极值事件的累积概率分布函数及概率密度函数。

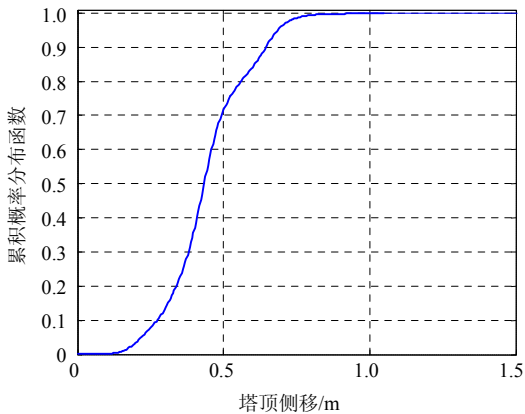


图 10 塔顶侧移极值事件累积概率分布函数

Fig.10 Cumulative probability distribution function of equivalent extreme value event for the drift at the top of the tower

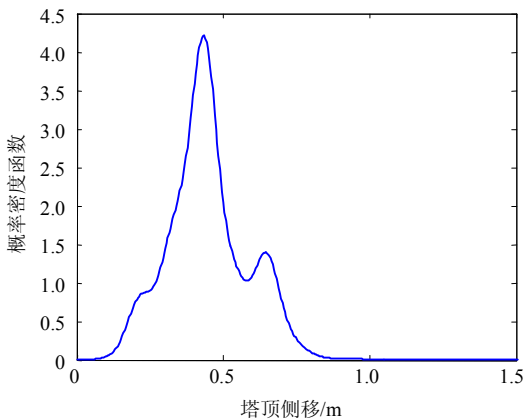


图 11 塔顶侧移极值概率密度函数

Fig.11 Probability density function of the equivalent extreme value event for the drift at the top of the tower

取风力发电高塔顶部侧移阈值为参数, 采用极值概率密度理论与 Poisson 模型计算的风力发电高塔顶部侧移动力可靠度见图 12。可见, 当阈值较小时, 按照 Poisson 模型计算的塔顶侧移动力可靠度较等价极值事件法的结果小些, 而阈值增大到一定程度时二种方法分析的动力可靠度趋于一致。主要原因在于, 界限较小时 Poisson 模型中首次跨越事件的独立性不充分, 导致分析结果出现较大误差, 尽管该误差是偏于保守的。当阈值趋于无穷大时, Poisson 模型的结果趋于精确解。而基于等价极值事件的极值密度演化理论则对于不同的阈值水平给出合理的分析结果。此外, 本算例分析结果表明, 当风力发电高塔顶部侧移阈值取为 1/65 塔高(1m)时, 其顶部侧移波浪动力可靠度接近于 1, 具有足够的安全水平。

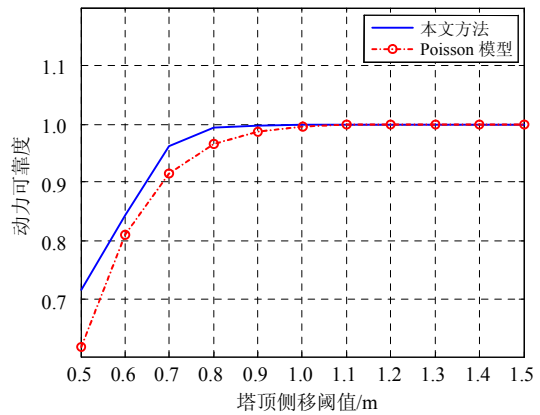


图 12 塔顶侧移动力可靠度分析结果

Fig.12 The results of dynamic reliability for top drift of the tower in terms of equivalent extreme event method and Poisson model

值得指出的是, 考虑塔身风荷载以及桨叶-塔身相互作用效应时本文方法仍然是适用的。但分析风和海浪共同作用下的结构动力可靠度需要确定风及波浪参数的统计分布并对其联合概率空间进行离散, 采用适当方法生成风荷载及波浪荷载并将其同时作用于结构进行分析。

5 结论

基于广义概率密度演化方程的极值概率密度理论可用于分析海洋结构在波浪作用下的动力可靠度问题。随机波面模拟时, 波面的幅值由随机 Fourier 海浪谱模型给出, 随机初相位和相位差谱共同确定其相位信息。采用 Airy 线性波理论在时域中模拟出波场, 相应的波浪力由 Morison 公式计算。

近海风力发电高塔在波浪作用下的顶部侧移由 ABAQUS 有限元软件求解获得。以塔顶侧移阈值为参数, 分别利用极值概率密度理论和 Poisson 模型计算出近海风力发电高塔在随机波浪作用下的动力可靠度。结果表明, 基于等价极值事件的极值密度演化法在不同的阈值水平下均可以给出合理的结果。而 Poisson 假定计算的可靠度在阈值水平较低时结果偏低, 且阈值越小偏差越大。本文方法克服了阈值较低时 Poisson 模型中独立性假定的影响, 而阈值较高时与 Poisson 模型结果吻合。

参考文献:

- [1] Neal E. Second order hydrodynamic forces due to stochastic excitation [C]. Proceedings of the 10th ONR Symposium, Cambridge, MA, 1974.
- [2] Vinje T. On the statistical distribution of second-order forces and motions [J]. International Shipbuilding Progress, 1983, 30: 58—68.
- [3] Naess A. The statistical distribution of second-order slowly varying forces and motions [J]. Applied Ocean Research, 1986, 8(2): 110—118.
- [4] Naess A. On the statistical analysis of slow-drift forces and motions of floating offshore structures [C]. Proceedings, 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Tokyo, Japan, 1986: 317—329.
- [5] Naess A. Response statistics of non-linear, second-order transformations to Gaussian loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 115(1): 103—127.
- [6] Naess A. Approximate first-passage and extremes of narrow-band Gaussian and non-Gaussian random vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 138(3): 365—380.
- [7] Winterstein S R, Ude T C, Marthinsen T. Volterra models of ocean structures: Extreme and fatigue reliability [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(6): 1369—1385.
- [8] Moarefzadeh M R, Melchers R E. Sample-specific linearization in reliability analysis of off-shore structures [J]. Structural Safty, 1996, 18(2): 101—122.
- [9] Siddiqui N A, Ahmad S. Reliability analysis against progressive failure of TLP tethers in extreme tension [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 68: 195—205.
- [10] Naess A, Karlsen H C. Numerical calculation of the level crossing rate of second order stochastic Volterra systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19: 155—160.
- [11] Moarefzadeh M R, Melchers R E. Nonlinear wave theory in reliability analysis of offshore structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006, 21: 99—111.
- [12] Naess A, Gaidai O. The asymptotic behaviour of second-order stochastic Volterra series models of slow drift response [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2007, 22: 343—352.
- [13] 李杰, 陈建兵. 随机结构非线性动力反应的极值密度演化分析[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 716—722.
Li Jie, Chen Jianbing. The probability density evolution method for analysis of dynamic nonlinear response of stochastic structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(6): 716—722. (in Chinese)
- [14] 陈建兵, 李杰. 非线性随机结构动力可靠度的密度演化方法[J]. 力学学报, 2004, 36(2): 196—201.
Chen Jianbing, Li Jie. The probability density evolution method for dynamic reliability assessment of nonlinear stochastic structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(2): 196—201. (in Chinese)
- [15] Chen J B, Li J. Dynamic response and reliability analysis of non-linear stochastic structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 33—44.
- [16] Li J, Chen J B. Dynamic response and reliability analysis of structures with uncertain parameters [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 62(2): 289—315.
- [17] Chen J B, Li J. The extreme value distribution and dynamic reliability analysis of nonlinear structures with uncertain parameters [J]. Structural Safety, 2007, 29: 77—93.
- [18] Li J, Chen J B, Fan W L. The equivalent extreme-value event and evolution of the structural system reliability [J]. Structural Safety, 2007, 29: 112—131.
- [19] Li J, Chen J B. The principle of preservation of probability and the generalized density evolution equation [J]. Structural Safety, 2008, 30: 65—77.
- [20] 陈建兵, 李杰. 随机结构动力可靠度分析的极值概率密度方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 39—44.
Chen Jianbing, Li Jie. The extreme value probability density function based method for dynamic reliability assessment of stochastic structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(6): 39—44. (in Chinese)
- [21] Miles J W. On the generation of surface waves by shear flows [J]. J. Fluid Mech., 1957, 3: 185—204.
- [22] 文圣常, 于宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 331—332.
Wen Shengchang, Yu Zhouwen. Ocean wave theory and its computation principle [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 331—332. (in Chinese)
- [23] 徐亚洲, 李杰. 风浪相互作用的 Stokes 模型[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 281—286.
Xu Yazhou, Li Jie. Stokes Model of wind-wave interaction [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 281—286. (in Chinese)

(参考文献[24]—[29]转第 409 页)

- 直裂缝井压力动态分析[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 724—726.
- Cai Mingjin, Jia Yonglu, Wang Yongheng, et al. Dynamic pressure analysis on wells with vertical fractures in low-permeability dual-porosity reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 724—726. (in Chinese)
- [14] 蔡明金, 张焱, 吴玉君, 等. 缝洞型油藏垂直裂缝井压力动态分析[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(4): 141—145.
- Cai Mingjin, Zhang Tao, Wu Yujun, et al. Dynamic pressure analysis on wells with vertical fractures in fracture-vugs reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(4): 141—145. (in Chinese)
- [15] 同登科, 郑利, 王清河. 考虑二次梯度项影响的双重介质垂直裂缝井压力动态分析[J]. 力学季刊, 2010, 31(3): 395—400.
- Tong Dengke, Zheng Li, Wang Qinghe. Pressure behavior analysis of vertically fractured well in double porosity media considering effect of quadratic gradient term [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(3): 395—400. (in Chinese)
- [16] 张建国, 杜殿发, 侯健, 等. 油气层渗流力学[M]. 东营, 山东: 中国石油大学出版社, 2008: 139—148.
- Zhang Jianguo, Du Dianfa, Hou Jian, et al. Mechanics of porous media flow in hydrocarbon reservoir [M]. Dongying, Shandong: University of Petroleum Press, 2008: 139—148. (in Chinese)
- [17] Jorge E P, Adolfo A R, Horacio F. Simulation of flow in discrete deformable fractured porous media [C]// SPE Reservoir Simulation Symposium. Texas USA, SPE Press, 2011.
- [18] Wu Y S, Pruess K. Integral solutions for transient fluid flow through a porous medium with pressure-dependent permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37(1/2): 51—61.
- [19] 廖新维, 沈平平. 现代试井分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 171—173.
- Liao Xinwei, Shen Pingping. Modern well testing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 171—173. (in Chinese)
- [20] R L Burden, J D Faires. Numerical analysis (8th) [M]. USA: Thomson Higher Education, 2005: 57—67.

(上接第 401 页)

- [24] 徐亚洲. 随机海浪谱的物理模型与海洋结构波浪动力可靠度分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- Xu Yazhou. Physical Model of Wave Spectrum and Ocean Dynamic Reliability of Marine Structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [25] 陈建兵, 李杰. 结构随机响应概率密度演化分析的数论选点法[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 134—140.
- Chen Jianbing, Li Jie. Strategy of selecting points via number theoretical method in probability density evolution analysis of stochastic response of structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 38(1): 134—140. (in Chinese)
- [26] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 60—63.
- Li Jie, Li Guoqiang. Introduction to earthquake engineering [M]. Beijing: Earthquake Press, 1984: 60—63. (in Chinese)
- [27] Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, et al. The forces exerted by surface waves on piles [J]. Petroleum Transactions, 1950, 189: 149—156.
- [28] 李桂青, 曹宏, 李秋胜, 霍达. 结构动力可靠性理论及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 63—64.
- Li Guiqing, Cao Hong, Li Qiusheng, Huo Da. Theory and application of structural dynamic reliability [M]. Beijing: Earthquake Press, 1993: 63—64. (in Chinese)
- [29] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 496—498.
- Zhu Weiqiu. Random vibration [M]. Beijing: Science Press, 1992: 496—498. (in Chinese)