

基于子集模拟法的风机叶片可靠度分析

刘 岗, 封周权*, 华旭刚, 陈政清

(湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 风机叶片是风机机组中最重要的组件之一,其可靠性对整个发电系统的健康运行十分关键。传统的蒙特卡罗法可靠度计算效率较低,本文将子集模拟法应用到风机叶片的可靠度计算中,通过合理选取中间失效事件临界值和建议概率密度函数,采用 Metropolis 算法模拟产生一系列的样本,极大地提高了抽样效率。结果表明,子集模拟法在风机叶片可靠度计算中精度较高,且结构的失效概率越小,相比于传统蒙特卡罗法效率更高,可以极大地减轻计算压力。

关键词: 子集模拟;可靠度分析;小失效概率;风机叶片;叶素动量理论

中图分类号: O213.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2019)05-0636-06

1 引 言

风力发电机组是一种旋转机械,动力问题是其根本问题。风机叶片是将风的机械能转化成电能的关键元件,是风电机组中最重要的部件之一。与此同时,叶片也是风力机动力荷载的主要承载构件,其寿命和可靠性决定了发电机组的效益、实用性和耐久性。叶片在各种环境条件下服役,所受的荷载包括重力荷载、气动力荷载和伺服控制力荷载等。整个风机的设计寿命通常取为 15~20 年,在如此长时间内,叶片会经历各种不确定性的运行环境和外部荷载,因此风机叶片的可靠度分析显得尤为重要^[1]。

在 20 世纪 90 年代以前,很少有文献涉及到风机的可靠度分析研究,Veers^[2]在风机的设计中意识到风机组成部分的随机性和不确定性,首次将可靠度分析理论应用到垂直轴风机叶片的设计中。随后,Ronold 等^[3,4]将可靠度分析理论应用于水平轴风机叶片的疲劳问题研究。21 世纪初以来,学者们提出了越来越多的可靠度分析方法,可靠度分析在风机组件上也得到了更多的应用^[5-7]。

可靠度分析方法主要包括矩方法和数值模拟法等。矩方法主要有一阶可靠度法、二阶可靠度法和一次二阶矩法等,但传统的矩方法很难甚至无法

处理高维和高度非线性性能函数的可靠度分析。而数值模拟法的计算效率和精度都不受性能函数维度和非线性程度的影响,因此数值模拟法在处理高维和高度非线性性能函数情况下的可靠度分析时呈现出巨大的优势。蒙特卡罗仿真^[8] MCS (Monte Carlo simulation)是最简单直接的方法,但是在处理高可靠度(低失效概率)计算问题时,其计算效率较低,甚至有时是无法接受的。

国内外学者对这些问题进行了大量的研究工作,Au 等^[9]通过引入重要性概率密度函数,在设计验算点的附近进行重要性抽样,来增加样本落入失效区域的频率,达到减少计算量的目的。吴建成等^[10]在此基础上,改进和发展了重要性抽样方法。重要性抽样技术(Importance sampling technique)可以对给定的概率分布进行修改,使对模拟结果贡献大的部分多出现,从而提高效率。但是在运用重要性抽样时,需要寻找分布函数,速度较慢,并且当分布函数在某点为 0 或者接近 0 时,会使结果不稳定。

子集模拟法^[11-14](subset simulation)是一种计算高可靠性(低失效概率)问题较为高效且精确的方法,越来越受到国内外学者的关注。对常规可靠性问题和时变可靠性问题都有较好的处理结果。本文利用子集模拟法替代传统蒙特卡罗法来处理叶片的可靠度计算问题。

2 叶片模型的建立

风力机叶片翼型最初是由飞机机翼发展而来

收稿日期:2018-07-28;修改稿收到日期:2019-01-25.

基金项目:重点研发计划国际创新合作(2016YFE0127900);
中央高校基本科研业务费(531107050913);湖南省
高校创新平台开放基金(17K022)资助项目.

作者简介:封周权*(1982-),男,博士,助理教授
(E-mail:zqfeng@hnu.edu.cn).

的,因此叶片截面形状通常有标准翼型系列进行参照,但风力机一般在近地面运行,桨叶粗糙度易受影响,且易失速,直接运用机翼截面并不经济。因此,丹麦等风能技术发达的国家从20世纪80年代开始研究风机专用新翼型,并改进了各自的翼型系列。具有代表性的有NREL翼型系列、美国的SERI翼型系列、丹麦的RIS ϕ 1-A翼型系列、荷兰的DU翼型系列和瑞典的FFA-W翼型系列等^[15]。

本文所采用的风力机叶片模型为美国可再生能源实验室(NREL)的5MW风力机叶片模型^[16],其数据参数已公开,其叶片某一截面形状如图1所示。

5 MW 风机转子高度为90 m,叶片个数为3,每个叶片长度为61.5 m,轮毂直径为3 m,共由8种不同翼型截面组成,在距叶片根部约20%的位置达到最大弦长4.7 m,转子高度处平均风速为15 m/s(额定风速),额定转速为12.1 rpm,风机的切入风速和切出风速分别为3 m/s和25 m/s。利用Ansys软件建立了叶片的有限元模型,前三阶频率分别为0.666 Hz,1.044 Hz和1.937 Hz,与NREL实验室提供的计算结果0.667 Hz,1.089 Hz和1.933 Hz相比^[16],误差不超过5%。本文关心的是叶片根部的弯矩,其与叶片材料性质无关,因此本文采用beam4梁单元和mass21质量单元建立有限元模型,如图2所示。

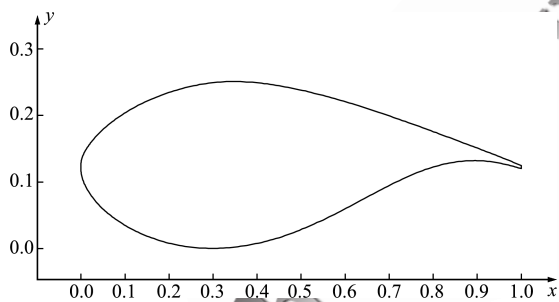


图1 叶片典型截面
Fig. 1 Typical cross section of the blade

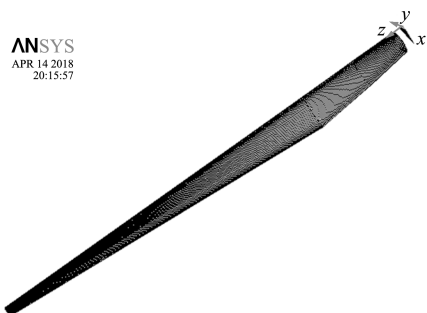


图2 叶片有限元模型
Fig. 2 Finite element model of a blade

在叶片根部施加固定端约束,在每一节点上施加风轮受到的荷载,即推力和扭矩。本文所关注的的数据为叶片根部的弯矩,在脉动风的作用下,弯矩会实时变化,根据根部弯矩是否超过某一阈值来评判叶片是否失效。

3 风场模拟

风场模拟需要根据目标功率谱函数模拟出脉动风场,常用的模拟方法有谐波合成法和线性滤波法AR^[17],后者计算量少,但是精度较差。随着计算机运行速度的加快,本文采用谐波合成法,用MATLAB编制风场模拟程序,目前国内外学者提出了大量的脉动风功率谱,本文脉动风谱采用如下形式,

$$\frac{nS_u(n)}{(u^*)^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (1)$$

$$\frac{nS_v(n)}{(u^*)^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2} \quad (2)$$

式中 $S_u(n)$ 为顺风向脉动风功率谱密度函数, $S_v(n)$ 为垂直风向脉动风功率谱密度函数, n 为风的脉动频率, $f = n z / V_z$ 为折算频率, u^* 为气流摩擦速度, V_z 为 z 高度处的平均风速。

每10 min的模拟时间实际运行时间为660 s,前60 s是为了消除瞬态响应的影响,后600 s为采样时间,时间步长为0.1 s。图3展示了在转子高度处的 u 和 v 方向的风速时程曲线, u 方向的平均风速为15 m/s, v 方向的平均风速为0 m/s。

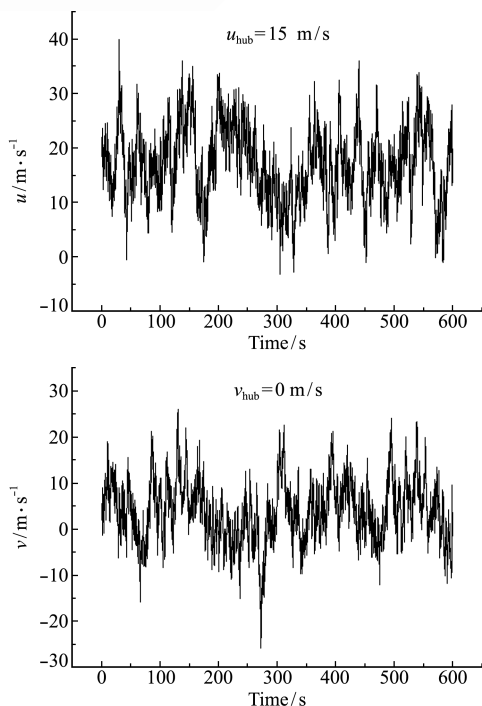


图3 转子高度处 u 和 v 方向的风速时程曲线
Fig. 3 u , v -components of wind inflow at hub height

4 经典叶素动量理论

叶素动量理论实际上是叶素理论和动量理论两种理论的耦合^[18]。在一维动量理论中,如图4所示,假设风轮是简单的一维模型,没有考虑风轮的实际几何形状。风力机吸收风中的动能并转化成机械能,在这种简单的一维模型中,风轮是一个可穿透的轮盘。风轮轮盘的作用如同一台阻力设备,风轮无穷远上游的风速为 v_0 , 抵达风轮后变为 u , 到达下游无穷远处降为 u_1 , 轴向诱导因子 a 定义为 $u = (1-a)v_0$, 对上下游分别应用伯努利方程可以得到下游的速度为 $u_1 = (1-2a)v_0$ 。

当风轮旋转时,假定径向性质相互独立,各个单元之间不会相互影响。旋转半径为 r , 风轮旋转的控制体积的截面面积是 $2\pi r dr$ 。

如图5所示,通过叶片截面所受到的相对速度 v_{rel} 是风轮平面处的轴向速度 $(1-a)v_0$ 和切向速度 $(1+a')\omega r$ 的合成, ω 是风轮旋转的角速度, r 是叶片单元距轮毂中心的距离, a 为轴向诱导因子, a' 为切向诱导因子。 θ 是叶片的局部桨距角, 定义为弦长和风轮平面的局部夹角; ϕ 是旋转平面和相对速度 v_{rel} 的夹角。从图5易知风攻角 $\alpha = \phi - \theta$ 。假设单位长度叶片上的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 已知, 由空气动力学的定义可知,

$$L = \frac{1}{2} \rho v_{rel}^2 c(r) C_l, \quad D = \frac{1}{2} \rho v_{rel}^2 c(r) C_d \quad (3,4)$$

$c(r)$ 是局部弦长(叶片的前缘到后缘的距离), 随距轮毂的距离变化而变化。

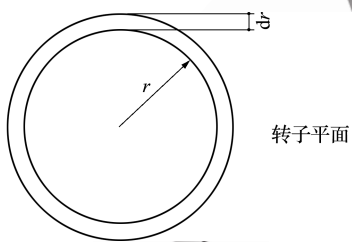


图4 叶素动量模型控制平面

Fig. 4 Plane of rotation controlled by blade element momentum

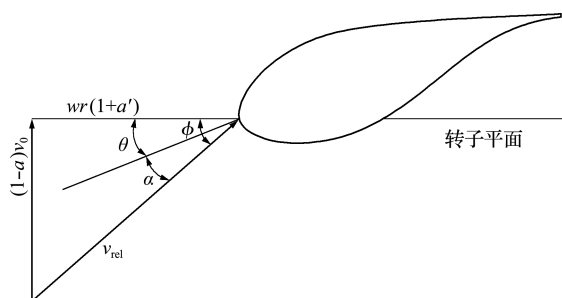


图5 风轮平面内的速度

Fig. 5 Velocity in the plane of rotation

将升力和阻力投影到与风轮平面垂直和相切的方向,如图6所示,可得

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (5)$$

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (6)$$

沿半径方向进行积分,可计算出叶片根部所受的合力和弯矩,如图7所示。

5 子集模拟法的基本原理

子集模拟方法是研究小失效概率事件的高效模拟方法,基本思想是利用每一阶段的条件失效事件来表示最终的小概率失效事件。模拟过程中,利用马尔科夫链原理^[19]由已知条件样本产生新的符合条件的新样本,使样本空间逐渐逼近小概率事件发生的样本空间,通过此方法尽量避免对未失效概率空间的重复无用计算,提高模拟效率。

结构的失效区域用 F 表示,本文用一系列的子失效区域来表示中间过程的条件失效事件,分别记为 $F = F_m \subset \dots \subset F_2 \subset F_1$, 则最终失效概率为

$$P_F = P(F_m) = P\left(\bigcap_{i=1}^m F_i\right) = P(F_m | \bigcap_{i=1}^{m-1} F_i) P\left(\bigcap_{i=1}^{m-1} F_i\right) = P(F_m | F_{m-1}) P\left(\bigcap_{i=1}^{m-1} F_i\right) = \dots = P(F_1) \prod_{i=1}^{m-1} P(F_{i+1} | F_i) \quad (7)$$

经过式(7),小失效概率事件可以表示为一系列大失效概率事件的乘积。即使 P_F 很小,条件失

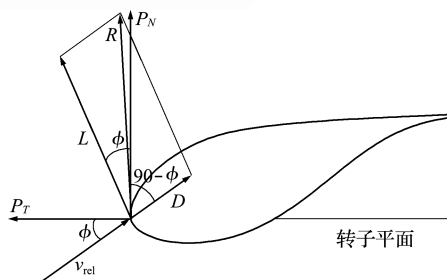


图6 叶片上的局部力

Fig. 6 Local forces of the turbine blade

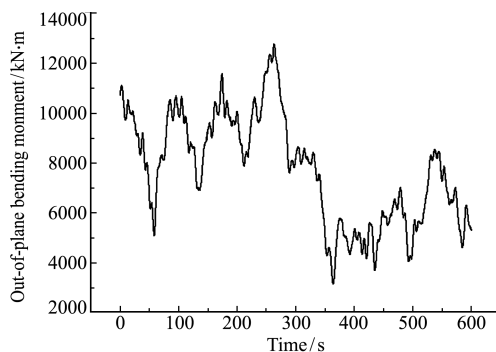


图7 叶片根部弯矩的时程曲线

Fig. 7 Time history of the out-of-plane bending moment at the blade root

效概率也可以足够大,使 P_F 经过几个阶段的累积后有效地模拟出来。

6 叶片根部失效的子集模拟分析

子集模拟方法的关键在于应用马尔科夫链蒙特卡罗法 MCMC 的原理产生符合条件的样本, MCMC 可以由已知样本产生相同概率分布的新样本。应用 MCMC 方法的关键在于选择适当的建议概率密度函数,因为此函数控制着根据当前样本值产生下一样本的过程。应用谐波合成法产生脉动风谱,在模拟平稳随机过程时需要产生均匀分布在 $0\sim 2\pi$ 的随机相位角^[20],由满足条件的随机相位角产生新的随机相位角,即由已知样本产生符合条件的新样本的过程称为马尔科夫链过程,本文的建议概率密度函数采用高斯概率分布函数。

为了方便实现模拟,一般采用固定的条件概率值 P_0 ,据此来确定每一个中间失效事件的界限值 b ,这样保证了中间过程每个阶段的条件失效概率处于相同的水平和一致的模拟精度。如第 i 步模拟产生了 N 个样本,将这 N 个样本按照升序排列,则第 $(1-P_0)N$ 个样本为第 i 个中间失效事件的界限值 b_i 。子集模拟产生新样本的过程是按以下步骤完成的,(1) 应用蒙特卡罗模拟方法进行计算,产生 N 个响应值,将这 N 个响应值按照升序排列,第 $(1-P_0)N$ 个响应值即为第一个界限值 b_1 ,此时 $P(F_1)=P_0$; (2) 根据落入子失效区域 F_1 的 P_0N 个样本,利用 MCMC 模拟算法产生 $(1-P_0)N$ 个马尔科夫链样本,则落入子失效区域 F_1 的样本和新产生的 $(1-P_0)N$ 个样本均服从同一概率分布函数,这一步中落在子失效区域 F_1 的总样本数目仍为 N 个,将这 N 个响应值重新按照升序排列,则第 $(1-P_0)N$ 个响应值即为第二个界限值 b_2 ,由此计算 $P(F_2|F_1)$; (3) 根据落入子失效区域 F_i 的 P_0N 个样本产生更多新的服从同一分布的样本; (4) 重复以上步骤计算 $P(F_{i+1}|F_i)$,直至达到所要求的最终失效事件的阈值 b_m 。在实际应用中,除最后一个条件失效事件,可令中间条件失效概率取为 $P(F_i)=P(F_{i+1}|F_i)=P_0=0.1(i=1,2,3\cdots)$,由此计算各个子失效区域 $F_i(i=1,2,3\cdots)$,总失效概率由各个条件失效概率的乘积来表示。

假设风机叶片根部弯矩达到或超过 2.2×10^4 kN·m 时,叶片即失效。本文分别模拟了两种工况,即额定风速为 15 m/s 和切出风速为 25 m/s。

首先,采用传统的蒙特卡罗方法进行模拟,两

种工况所取的样本数均为 10 万。蒙特卡罗法计算精度对应变异系数 $\delta=\sqrt{\frac{1-P_F}{NP_F}}\approx\sqrt{\frac{1}{NP_F}}$,一般变异系数在 35% 以内即可认为结果可接受。失效概率越小,达到可接受计算精度时,蒙特卡罗法所需样本数越多^[21]。平均风速为 15 m/s 时,应用蒙特卡罗法计算得到的失效概率为 0.00031 ($\delta=17.9$); 平均风速为 25 m/s 时,应用蒙特卡罗法计算得到的失效概率为 0.00040 ($\delta=15.6$)。

其次,应用子集模拟法对额定风速和切出风速分别进行了 5 次计算,每次计算每一阶段样本个数 $N=1000$,分四阶段计算。条件失效概率取为 0.1,即 $P(F_1)=P_0=0.1, P(F_2|F_1)=P_0=0.1, P(F_3|F_2)=P_0=0.1, p(F|F_3)=n/1000, p(F)=P(F_1)*P(F_2|F_1)*P(F_3|F_2)*p(F|F_3)=0.1*0.1*0.1*n/1000, n$ 为最后一阶段超过某一阈值的失效个数,结果列入表 1。其中,构造了 4 个子失效域,分别为 F_1, F_2, F_3 和 F , 4 次对应的反应界限值为 b_1, b_2, b_3 和 b_4 。 $b_1\sim b_3$ 是根据条件概率 $P_0=0.1$ 计算确定的中间失效事件的界限值,也就是每一阶段模拟 1000 个样本按照升序排列的倒数第 100 个样本为该阶段的界限值; b_4 为最终失效事件的阈值(即 2.2×10^4 kN·m)。在额定风速下,某次模拟过程 4 个阶段的样本按升序排列如图 8 所示,5 次计算结果列入表 1。

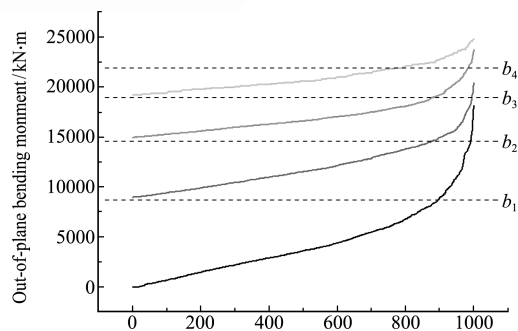


图 8 额定风速 4 阶段的计算结果
Fig. 8 Results of four steps at rated wind speed

表 1 额定风速算例的子集模拟结果
Tab. 1 Results with subset simulation method at rated wind speed

次数	b_1	b_2	b_3	b_4	失效概率
1	8821	15375	19981	22000	0.00021
2	9012	14994	19251	22000	0.00029
3	8875	15658	19326	22000	0.00026
4	9121	15035	20356	22000	0.00030
5	9035	15966	20586	22000	0.00022

在切出风速下,某次模拟过程4个阶段的样本按升序排列,如图9所示,5次计算结果列入表2。

由表1和表2可知,子集模拟法和传统蒙特卡罗法相比,计算结果稍微偏小,但波动不大,两次计算结果的变异系数分别为14.1%和18.8%,与前面蒙特卡罗方法的变异系数大致相当。子集模拟4阶段每阶段1000样本数,10%量级失效概率的抽样计算,每阶段的失效样本数为100,整个模拟过程只需要大约3700次抽样。若获得相同量级的失效样本数,采用传统的蒙特卡罗法求解时,额定风速下大约需要 $100/P_F=3.2\times 10^5$ 次抽样,是子集模拟抽样数量的86倍;切出风速下大约需要 $100/P_F=2.5\times 10^5$ 次抽样,是子集模拟抽样数量的68倍。表明失效概率越小时,子集模拟法相对于蒙特卡罗模拟法效率更高。

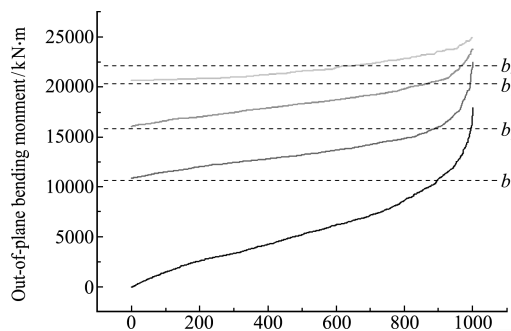


图9 切出风速4阶段的计算结果

Fig. 9 Results of four steps at cut-out wind speed

表2 切出风速算例的子集模拟结果

Tab. 2 Results with subset simulation method at cut-out wind speed

次数	b_1	b_2	b_3	b_4	失效概率
1	10875	16068	20671	22000	0.00039
2	10715	15940	20669	22000	0.00030
3	10860	16181	20786	22000	0.00035
4	10851	16163	21779	22000	0.00034
5	10766	16340	20556	22000	0.00036

7 结 论

本文应用子集模拟方法,计算了风机叶片在额定风速为15 m/s和切出风速为25 m/s运行时根部弯矩的失效概率,结果表明,风速越高,失效概率越大。给出了子集模拟法的计算原理和计算过程,并和传统的蒙特卡罗模拟法进行了比较,为叶片的可靠度计算提供了一种新的思路。

子集模拟法是计算结构可靠度的有效方法,尤其是当结构的失效概率较小时,更能体现此方法的优越性;应用子集模拟法可以将小概率失效事件转

化为一系列大概率的条件失效事件,有效减少了随机模拟方法的抽样次数,减少了计算时间,提高了计算机的模拟效率。计算表明,结构在受到随机激励时,失效概率越小时,应用子集模拟方法进行模拟,比蒙特卡罗模拟方法要求计算的样本次数更少,效率更高。

参考文献(References):

- [1] Mishnaevsky L. Composite materials for wind energy applications: Micromechanical modeling and future directions [J]. *Computational Mechanics*, 2012, **50** (2):195-207.
- [2] Veers P S. Fatigue Reliability of Wind Turbine Components [R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM, USA, 1990.
- [3] Ronald K O, Larsen G C. Reliability-based design of wind-turbine rotor blades against failure in ultimate loading [J]. *Engineering Structures*, 2000, **22** (6): 565-574.
- [4] Ronald K O, Wedel-Heinen J, Christensen C J. Reliability-based fatigue design of wind-turbine rotor blades [J]. *Engineering Structures*, 1999, **21** (12): 1101-1114.
- [5] Dong W B, Moan T, Gao Z. Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, **106**: 11-27.
- [6] Ronald K O, Larsen G C. Reliability-based design of wind-turbine rotor blades against failure in ultimate loading [J]. *Engineering Structures*, 2000, **22** (6): 565-574.
- [7] Njomo-Wandji W, Natarajan A, Dimitrov N. Development and design of a semi-floater substructure for multi-megawatt wind turbines at 50+m water depths [J]. *Ocean Engineering*, 2016, **125**: 226-237.
- [8] Seila A F. Simulation and the Monte Carlo Method [J]. *Technometrics*, 1982, **24** (2): 167-168.
- [9] Au S K, Beck J L. First excursion probabilities for linear systems by very efficient importance sampling [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2001, **16** (3): 193-207.
- [10] 吴建成, 吴剑国, 吴亚舸. 一种基于马尔可夫链模拟样本的自适应重要样本法 [J]. 华东船舶工业学院学报 (自然科学版), 2003, **17** (3): 8-12. (WU Jian-cheng, WU Jian-guo, WU Ya-ge. An adaptive important sampling method based on Markov Chain sample simulation algorithm [J]. *Journal of East China*

- Shipbuilding Institute (Natural Science Edition)*, 2003, **17**(3):8-12. (in Chinese)
- [11] Au S K, Beck J L. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2001, **16**(4): 263-277.
- [12] Ching J, Beck J L, Au S K. Hybrid Subset Simulation method for reliability estimation of dynamical systems subject to stochastic excitation [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2005, **20**(3):199-214.
- [13] Au S K, Ching J, Beck J L. Application of subset simulation methods to reliability benchmark problems [J]. *Structural Safety*, 2007, **29**(3):183-193.
- [14] 陈向前,董 聪,闫 阳. 结构可靠性分析的自适应子集模拟方法[J]. 计算力学学报, 2013, **30**(5): 627-632. (CHEN Xiang-qian, DONG Cong, YAN Yang. Adaptive subset simulation for structural reliability analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, **30**(5): 627-632. (in Chinese))
- [15] Bertagnolio F, Johansen J, Fuglsang P. wind turbine airfoil catalogue [J]. *Campus Risø*, 2001.
- [16] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[R]. National Renewable Energy Laboratory; Golden, CO, USA, 2009.
- [17] 张文福,马昌恒,肖 岩. 风场模拟中 AR 模型的若干问题[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(1): 124-130. (ZHANG Wen-fu, MA Chang-heng, XIAO Yan. Some issues on AR models for wind field simulation [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(1): 124-130. (in Chinese))
- [18] Leishman J G. *Principles of Helicopter Aerodynamics* [M]. Cambridge University Press, 2006.
- [19] Lange R B K. Markov chains; Gibbs fields, Monte Carlo simulation, and queues by pierre bremaud[J]. *SIAM Review*, 2000, **42**(4): 754-755.
- [20] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (CHEN Zheng-qing. *Bridge Wind Engineering* [M]. Beijing: China Communication Press, 2005. (in Chinese))
- [21] 刘 佩,姚谦峰. 基于子集模拟法的非线性结构动力可靠度计算[J]. 工程力学, 2010, **27**(12): 72-76. (LIU Pei, YAO Qian-feng. Dynamic reliability computation for non-linear structures based on subset simulation method[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(12): 72-76. (in Chinese))

Reliability computation of wind turbine blades based on subset simulation algorithm

LIU Gang, FENG Zhou-quan*, HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing

(Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Blades are one of the most important components in a wind turbine, thus their reliability is essential for the healthy operation of a wind turbine. The traditional Monte Carlo method is not efficient in reliability calculation. In this paper, the subset simulation method is applied to the reliability calculation of wind turbine blades. By reasonably selecting the critical value of intermediate failure events and the suggested probability density function, a series of samples are simulated by using Metropolis algorithm, which greatly improves the sampling efficiency. The results show that the subset simulation method is accurate and renders a higher efficiency for the reliability calculation of wind turbine blades, compared with traditional Monte Carlo simulation in the situation of very small failure probability.

Key words: subset simulation; structural reliability analysis; small failure probabilities; wind turbine blade; blade element momentum theory

引用本文/Cite this paper:

刘 岗,封周权,华旭刚,等. 基于子集模拟法的风机叶片可靠度分析[J]. 计算力学学报, 2019, **36**(5): 636-641.

LIU Gang, FENG Zhou-quan, HUA Xu-gang, et al. Reliability computation of wind turbine blades based on subset simulation algorithm [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(5): 636-641.