

风速不确定性对风力机气动力影响量化研究¹⁾

唐新姿²⁾ 王效禹 袁可人 彭锐涛

(湘潭大学机械工程学院, 湖南湘潭 411105)

摘要 风力机气动力学一直是国内外研究的热点课题之一。目前相关研究大都是基于确定性工况条件, 但因风力机常年工作在自然来流复杂环境, 风速随机波动致使风电系统呈现不确定性, 对电网稳定性带来巨大挑战, 因此进行不确定风速条件下风力机气动力学研究具有重要意义。为揭示不确定性对风力机流场影响机理并明确其对气动力的影响程度, 本文提出一种风力机不确定空气动力学分析方法, 基于修正叶素动量理论和非嵌入式概率配置点法, 建立水平轴风力机不确定性空气动力学响应模型; 以 NREL Phase VI S809 风力机叶轮为研究对象, 基于该模型提取风力机输出随机响应信息, 量化不确定风速对风力机风轮功率、推力、叶片挥舞弯矩和摆振弯矩的影响程度; 通过分析流动诱导因子不确定性在叶片展长方向上的分布规律, 揭示不确定因素在风力机本体上的传播机制, 为风电系统设计及应用提供理论依据和重要参考。结果表明, 风速波动对风力机功率和气动力影响显著, 高斯风速标准差由 0.05 倍增大至 0.15 倍均值, 功率和推力最大波动幅度分别由 13.44% 和 8.00% 增大至 35.11% 和 22.02%, 叶片挥舞弯矩和摆振弯矩最大波动幅度分别由 7.20% 和 12.84% 增大至 19.90% 和 33.49%。来流风速不确定性导致叶片根部位置气流明显波动, 可以考虑在该部分采取流动控制措施降低叶片对风速不确定性的敏感程度。

关键词 风力机, 不确定性, 非嵌入式概率配置点法, 叶素动量理论, 风能利用系数

中图分类号: TB12 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-214

QUANTITATION STUDY OF INFLUENCE OF WIND SPEED UNCERTAINTY ON AERODYNAMIC FORCES OF WIND TURBINE¹⁾

Tang Xinzi²⁾ Wang Xiaoyu Yuan Keren Peng Ruitao

(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract Wind turbine aerodynamics has been one of the hottest research topics at home and abroad. At present, most relevant researches are based on deterministic working conditions. However, since wind turbine works in the complex environment of natural flow in the atmosphere all the year round, wind speed fluctuates and changes randomly, the power output of wind turbine is uncertain. The uncertainty of wind power system brings great challenges to the stability of national grid. It is important to study the aerodynamics of wind turbine under uncertain wind speed conditions. In order to reveal the influence mechanism of uncertainty on wind turbine flow field and to determine its influence on loads, this paper

2019-07-22 收稿, 2019-11-11 录用, 2019-11-18 网络版发表.

1) 湖南省教育厅 (19B539, 18A077), 国家自然科学基金 (51305377, 51575466, 51975504), 湖南省自然科学基金 (2018JJ4082) 资助项目.

2) 唐新姿, 副教授, 主要研究方向: 风力机气动力学及叶轮机械多学科优化研究. E-mail: xinzitang@163.com

引用格式: 唐新姿, 王效禹, 袁可人, 彭锐涛. 风速不确定性对风力机气动力影响量化研究. 力学学报, 2020, 52(1): 51-59

Tang Xinzi, Wang Xiaoyu, Yuan Keren, Peng Ruitao. Quantitation study of influence of wind speed uncertainty on aerodynamic forces of wind turbine. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 51-59

proposes an uncertain aerodynamic analysis method for wind turbine. Based on the blade element momentum theory and the non-intrusive probabilistic collocation, the uncertainty aerodynamic response model of horizontal axis wind turbine was established. Taking the NREL Phase VI S809 wind turbine rotor as the research object, the random output response information of wind turbine was extracted, and the influence of uncertain wind speed on turbine power, thrust, blade flapwise bending moment and edgewise moment of wind turbine were quantified. Based on the uncertain analysis of the flow induction factors in the length direction of the blade, the uncertainty propagation mechanism in the wind turbine field was revealed, which provides a reference for the wind power system design and application. Results show that, the wind speed fluctuation has a significant influence on the wind turbine power and aerodynamic forces. The standard deviation of random Gaussian wind speed range increases from 0.05 to 0.15 times average speed, the maximum fluctuation ranges of power and thrust increase from 13.34% and 8.00% to 35.11% and 22.02%, respectively; the maximum fluctuation ranges of blade flapwise bending moment and edgewise moment increase from 7.20% and 12.84% to 19.90% and 33.49% respectively. The uncertainty of the incoming wind speed leads to the obvious fluctuation of the local flow at the blade root sections, which indicates that flow control techniques can be applied in this part of the blade to reduce the sensitivity to the uncertainty of wind speed.

Key words wind turbine, uncertainty, NIPRC, BEM, wind energy utilization factor

引 言

风力机常年运行于地表大气层中, 工作环境非常复杂. 由于地表地貌, 高度, 气候等差异, 实际自然来流风速随机波动. 风速不确定性造成风力机气动力和载荷分布不确定性, 对风电稳定性和可靠性产生严重影响, 开展风力机复杂工况下气动不确定性研究对于保障风电系统高效可靠运行具有重要意义.

目前风力机气动载荷研究主要方法有数值计算方法、叶素动量 (blade-element momentum, BEM) 理论和风洞试验等. 其中, 叶素动量理论是风力机气动设计普遍采用的方法, 该方法应用多基于确定性工况条件. 为提高该方法在复杂工况的适应性, 国内外学者针对该方法进行了相关改进, 包括气动弹性修正^[1]、动态失速修正^[2]、三维效应修正^[3-7]、阻力修正^[8]和风切变修正^[9]等, 这些修正使得 BEM 应用更为广泛, 但不确定工况问题仍然有待解决. 针对风电不确定性, 国内外学者在预测模型^[10]、控制策略^[11-15]和翼型^[16-22]等方面开展了相关研究. 考虑风速变化, Keshavarzadeh 等^[23]结合 Von Karman 模型和非嵌入式混沌多项式将风速表示为时间、半径和随机变量的函数, 基于叶素动量理论和牛顿迭代法提出水平轴风力机叶片不确定性优化方法. Murcia 等^[24]构建四维湍流空间, 提出在多种不确定湍流参数下预测风力机气动性能方法. Antonini 等^[25]基于四种湍流模型并对数值模拟结果进行加权处理, 揭示考虑风

向不确定性的重要性. Toft 等^[26]基于加速因子和风力机与测量位置之间距离建立风速不确定性概率模型以评估风力机结构疲劳载荷. Horna 等^[27]研究了风速和风向不确定性以及环境载荷不确定性对海上风力机地基疲劳可靠性的影响. Yan 等^[28]提出一种包含桨矩角和风向参数的风力机功率曲线模型描述能量转化不确定性.

复杂工况下风力机气动力研究本身是具有挑战性的研究热点问题, 不确定问题正受到国内外学者重点关注. 采用数值模拟或风洞试验方法进行工况不确定条件下风力机气动力研究将非常复杂且工作量巨大. 本文提出一种基于修正叶素动量理论和非嵌入式概率配置点法的风力机不确定气动计算方法, 建立水平轴风力机不确定性空气动力学响应模型; 基于该模型, 以 NREL Phase VI S809 风力机为研究对象, 量化不确定工况下随机气动边界条件对风力机气动力的影响程度; 从气动诱导上揭示不确定性在叶片展长方向上的传播机制, 为风力机设计与应用提供理论依据和重要参考.

1 不确定风力机气动力学计算模型

1.1 修正叶素动量理论

目前描述风轮作用力与来流速度之间的关系主要有考虑尾涡旋转的修正叶素动量理论. 该理论认为, 当气流作用在风轮上产生转矩时, 气流同样会受

到风轮反作用. 风轮对气流的影响用诱导因子表示, 叶片截面速度关系如图 1 所示.

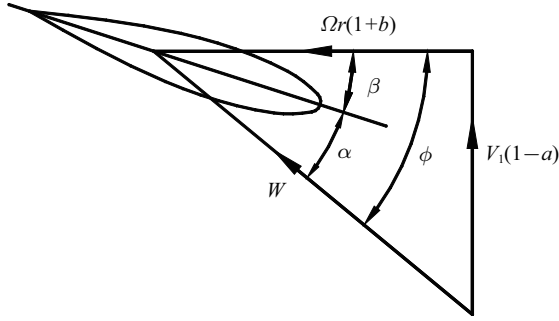


图 1 叶片截面速度示意图

Fig. 1 Velocity of blade element

根据动量理论, 得叶片扭矩 Q 和推力 T 为

$$dQ = 4\pi\rho V_1(1-a)b\Omega r^3 dr \quad (1)$$

$$dT = 4\pi\rho V_1^2(1-a)ardr \quad (2)$$

式中, a 为轴向诱导因子; b 为周向诱导因子; r 为叶素半径, m; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; V_1 为来流风速, m/s; Ω 为叶轮转速, r/min; α 为攻角, ($^\circ$); β 为桨矩角, ($^\circ$).

根据叶素理论, 同样得到叶片扭矩 Q 和推力 T 为

$$dQ = \frac{1}{2}B\rho W^2(C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)crdr \quad (3)$$

$$dT = \frac{1}{2}B\rho W^2(C_l \cos \phi + C_d \sin \phi)crdr \quad (4)$$

式中, B 为叶片数; c 为弦长, m; C_l 为翼型升力系数; C_d 为翼型阻力系数; W 为相对风速, m/s; ϕ 为入流角, ($^\circ$). 其中, 相对风速、来流风速与叶轮转速的关系为

$$W = \sqrt{V_1^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+b)^2} \quad (5)$$

动量理论和叶素理论结合得

$$a = \frac{\sigma C_t}{4 \sin^2 \phi + \sigma C_t} \quad (6)$$

$$b = \frac{\sigma C_n}{4 \sin \phi \cos \phi - \sigma C_n} \quad (7)$$

式中, C_t 为叶素切向力系数; C_n 为叶素法向力系数; σ 为风轮实度, $\sigma = Bc/(2\pi r)$.

当轴向诱导因子 $a > 0.38$ 时, 根据 Wilson 和 Prandtl 方法进行修正

$$\frac{0.587 + 0.96a}{(1-a)^2} = \frac{\sigma C_t}{4F \sin^2 \phi} \quad (8)$$

其中 F 为叶尖和轮毂损失修正.

叶尖损失修正系数 F_{tip} 为

$$F_{\text{tip}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[\frac{-B(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right\} \quad (9)$$

轮毂损失修正系数 F_{hub} 为

$$F_{\text{hub}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[\frac{-B(r-r_{\text{hub}})}{2r_{\text{hub}} \sin \phi} \right] \right\} \quad (10)$$

$$F = F_{\text{tip}} \cdot F_{\text{hub}} \quad (11)$$

式中, F_{tip} 为叶尖损失; F_{hub} 为轮毂损失; R 为叶片半径, m; r 为叶素半径, m; r_{hub} 为轮毂半径, m.

修正后轴向诱导因子为

$$a = \frac{\sigma C_t}{4F \sin^2 \phi + \sigma C_t} \quad (12)$$

修正后周向诱导因子为

$$b = \frac{\sigma C_n}{4F \sin \phi \cos \phi - \sigma C_n} \quad (13)$$

通过式 (12) 和式 (13) 求解每个半径位置上周向和轴向诱导因子描述风力机准三维流场变化, 进而得到风力机气动力.

1.2 非嵌入式概率配置点法

本文将风力机气动力计算方法和非嵌入式概率配置点法 (no-intrusive probabilistic collocation, NIPRC) 结合, 进行不确定气动力计算. NIPRC 是混沌多项式法对随机变量进行多项式展开形式变换和随机配置点法的结合. 随机变量 $\phi(\mathbf{x}, t, \theta)$ 是关于时间 t , 空间 \mathbf{x} 和随机变量 θ 的函数, 其表达式为

$$\phi(\mathbf{x}, t, \theta) = \sum_{k=1}^n \phi_k(\mathbf{x}, t) h_k(\xi(\theta)) \quad (14)$$

式中, $\phi_k(\mathbf{x}, t)$ 是随机变量 $\phi(\mathbf{x}, t, \theta)$ 在配置点 θ_k 的解, 是由确定性计算获得, h_k 表示与该点对应的拉格朗日差值多项式, 是通过 n 个配置点的 $n-1$ 阶多项式, 该多项式表达式为

$$h_k(\xi(\theta)) = \prod_{i=1, i \neq k}^n \frac{\xi(\theta) - \xi(\theta_i)}{\xi(\theta_k) - \xi(\theta_i)} \quad (15)$$

式中, $h_k(\xi(\theta_i)) = \delta_{ki}$ 是和配置点对应的拉格朗日差值多项式, n 为配置点个数.

考虑到风速为自然随机等特点, 随机性符合正态分布, 因此本文配置点采用随机空间 Ω 上对 $\phi(\mathbf{x}, t, \theta)$ 积分的高斯积分点, 其表达式为

$$\int_a^b f(x)\rho(x)dx \approx \sum_{k=1}^n w(x_k)f(x_k) \quad (16)$$

式中, x_k 是和权函数 $\rho(x)$ 对应的正交多项式的零点, 即高斯点; $w(x)$ 是各高斯点对应的求积系数.

对于高斯分布随机变量, 其概率密度函数为

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/2} \quad (17)$$

与其对应的 Hermite 多项式的权函数为

$$w(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/2} \quad (18)$$

对应高斯积分为 Gaussian-Hermite 积分, 高斯积分点即为 n 次 Hermite 多项式的 n 个零点, 对应的求积系数即为权重. 其具体表达式为

$$w(x_k) = \frac{2^{n-1} n! \sqrt{n}}{n^2 [H_{n-1}(x_k)]^2} \quad (19)$$

在各个配置点进行确定性分析之后, 根据统计学中均值和方差的定义, 推导出均值和方差的计算公式, 得到不确定风速对于气动力的影响, 具体表达式为

$$\bar{\phi} = \sum_{k=1}^n w_k \phi_k(x, t) \quad (20)$$

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^n w_k \phi_k^2(x, t) - \bar{\phi}^2 \quad (21)$$

2 研究对象及方法验证

NREL Phase VI 风力机^[29]为三叶片失速调节风力机, 叶片为扭曲锥形, 基于 S809 翼型设计, 叶片半径为 5.03 m, 额定功率为 20 kW, 锥角为 3.4°, 转速为 72 r/min. 叶片轮毂长度为 0.724 m, 从 0.724 m 处的轮毂到 S809 翼型之间为线性过度. 该风力机模型由美国国家航空航天局基于 24.4 m × 36.6 m 风洞进行空气动力学实验.

首先基于修正叶素动量理论建立确定性风力机气动模型, 编制 MATLAB 程序进行风力机气动分析. 图 2 为功率和推力计算曲线和实验曲线对比. 由图可知, 功率和推力计算值与实际测量值基本吻合, 验证了本文所建立气动模型的正确性.

根据自然风速统计规律, 假设随机风速服从高斯分布, 采用非嵌入式概率配置点法结合修正叶素动量理论进行不确定性分析, 计算流程如图 3 所示. 首先输入风速工况条件, 然后利用 NIPRC 方法得到风速配置点及其求积系数, 再应用 BEM 方法求解风力机气动参数, 最后计算输出功率、推力、挥舞弯矩和摆振弯矩, 及其均值和标准差.

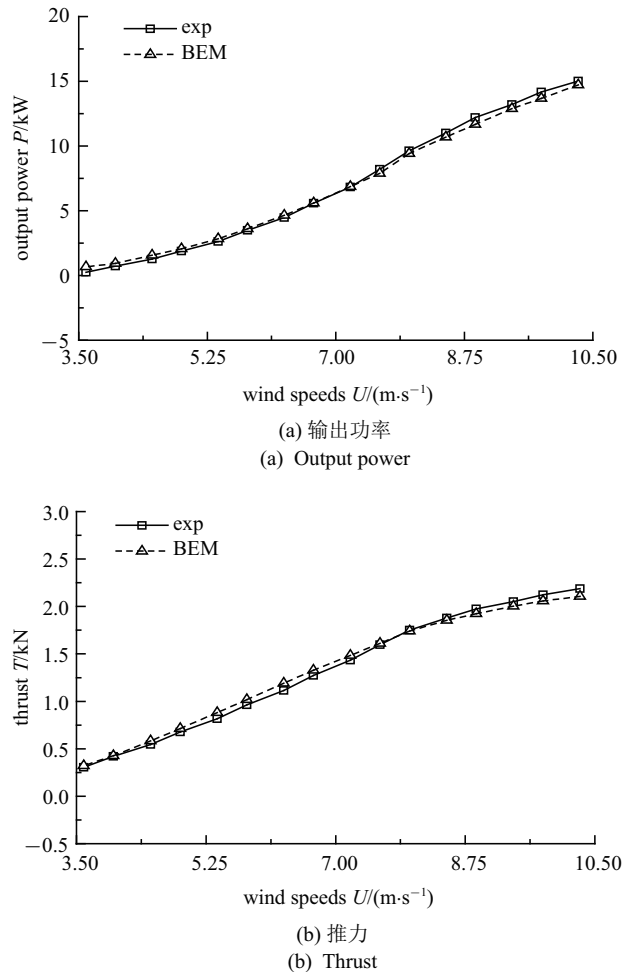


图 2 输出功率和推力计算值和实验值对比
Fig. 2 Comparison of calculated and experimental output power and thrust

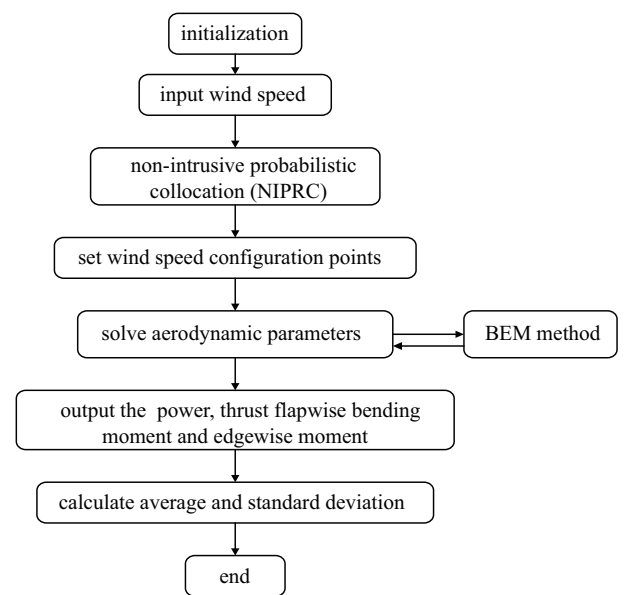


图 3 不确定性分析计算流程

Fig. 3 Flow chart of uncertainty calculation

平均风速为 7 m/s, 考虑到平坦地形大气层常规湍流强度为 5%~15% [30], 取标准差为平均值 10%. 对应一阶、二阶和三阶配置点和权重如表 1 所示.

表 1 平均风速为 7 m/s 的不同阶配置点及其响应的权重
Table 1 Different order configuration points with average wind speed of 7 m/s and the weight of their responses

1st order		2nd order		3rd order	
point	weights	point	weights	point	weights
6.3	0.5	5.788	0.166 67	5.365 9	0.045 88
7.7	0.5	7	0.666 67	6.480 6	0.454 12
—	—	8.212	0.166 67	7.519 4	0.454 12
—	—	—	—	8.634 1	0.045 88

表 2 给出了风速为 7 m/s 时一阶、二阶和三阶配置点功率和推力计算值对比. 二阶和三阶配置点计算结果基本吻合, 因此后续基于二阶 NIPRC 计算.

表 2 不同阶配置点功率和推力的计算值
Table 2 Calculated power and thrust with different order configuration points

	1st order		2nd order		3rd order	
	P/kW	T/kN	P/kW	T/kN	P/kW	T/kN
average value	5.688	1.443	5.7081	1.443	5.670	1.442
standard deviation	1.65	0.284	1.607	0.285	1.625	0.286

为验证不确定分析计算模型, 采用蒙特卡洛 (Monte Carlo, MC) 方法进行验证. 表 3 给出了风速为 7 m/s 时采用 NIPRC 和 MC 计算功率和推力的平均值和标准差对比. 采用两种方法计算所得结果基本一致, 功率和推力最大误差分别为 3.10% 和 2.81%, 验证了不确定分析模型的正确性.

表 3 NIPRC 和 MC 功率和推力计算值对比
Table 3 Calculated power and thrust based on NIPRC and MC

Calculation method	Power/kW		Thrust/kN	
	average	standard deviation	average	standard deviation
NIPRC	5.708 2	1.607 1	1.443 6	0.284 4
MC	5.748 6	1.680 5	1.453 5	0.282 3
deviation	2.11%	3.10%	1.12%	2.81%

3 结果分析

取 5~9 m/s 五个平均风速, 标准差 StD 分别为 5%, 10% 和 15% 倍均值, 进行多风速工况多种不确定度对比分析.

3.1 功率和推力

图 4 为不同平均风速及标准差下风力机输出功率不确定性对比. 相同平均风速不同标准差下输出功率均值基本一致, 标准差越大输出功率波动幅度越大. 平均风速为 7 m/s 输出功率波动达到最大, 其中标准差为 5% 时最大波动幅度为 13.44%, 标准差为 10% 时最大波动幅度为 24.94%, 标准差为 15% 时最大波动幅度为 35.11%.

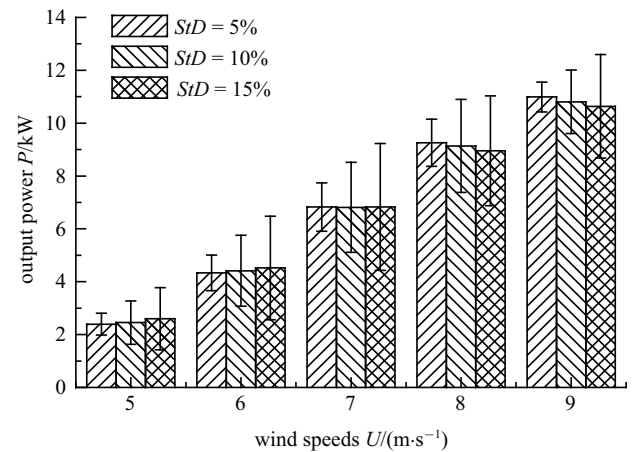


图 4 不同风速及标准差下风力机输出功率不确定性
Fig. 4 Uncertainty of wind turbine output power under different wind speeds and standard deviations

图 5 为不同平均风速及标准差下风力机推力不确定性对比. 相同平均风速不同标准差下推力均值基本一致, 标准差越大推力波动幅度越大. 标准差为 5% 时, 推力的波动幅度在风速为 7 m/s 最大, 最大波动幅度为 8.00%; 标准差为 10% 时, 推力的波动幅度

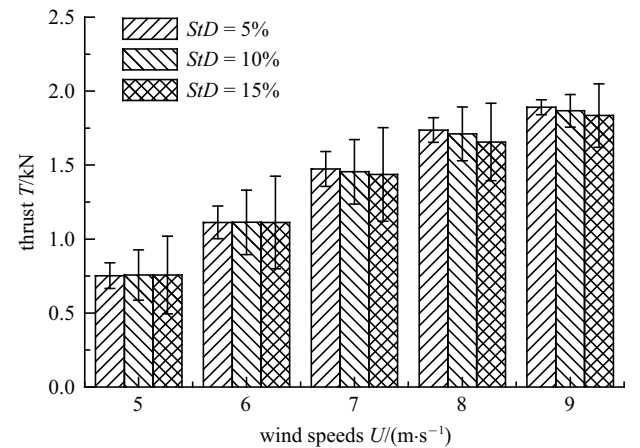


图 5 不同风速及标准差下风力机推力不确定性
Fig. 5 Uncertainty of wind turbine thrust under different wind speeds and standard deviations

在风速为 7 m/s 时最大, 最大波动幅度为 14.96%; 标准差为 15% 时, 推力的波动幅度在风速为 7 m/s 时最大, 最大波动幅度为 22.02%.

3.2 挥舞弯矩和摆振弯矩

图 6 为不同风速及标准差下风力机挥舞弯矩不确定性对比. 不同标准差下挥舞弯矩均值基本一致, 标准差越大, 挥舞弯矩波动越大. 三种标准差下挥舞弯矩波动均在风速为 7 m/s 时最大, 标准差为 5% 时最大波动幅度为 7.20%, 标准差为 10% 时最大波动幅度为 13.64%, 标准差为 15% 最大波动幅度为 19.90%.

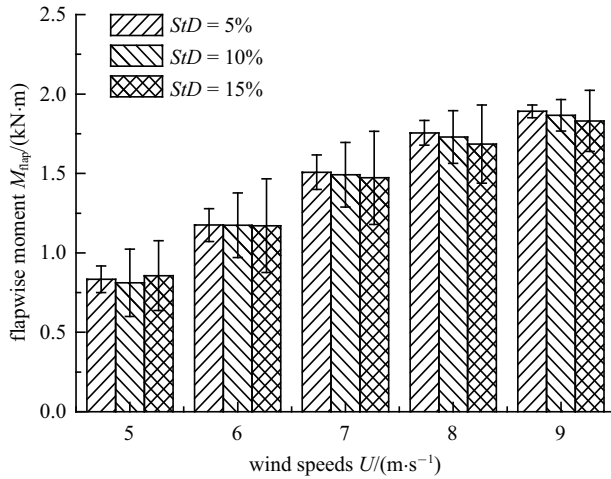


图 6 不同风速及标准差下叶根挥舞弯矩不确定性
Fig. 6 Uncertainty of the flapwise moment of the blade root under different wind speeds and standard deviations

为进一步分析不确定性影响, 计算挥舞弯矩在叶片全长上的分布, 由图 6 分析得到在风速为 7 m/s 时挥舞弯矩的波动最大, 因此选择 7 m/s 计算.

图 7 为风速为 7 m/s 时不同标准差下挥舞弯矩在叶片全长上的分布. 三种标准差下均值基本相同, 标准差越大挥舞弯矩波动越大. 标准差为 5% 时, 挥舞弯矩在 r/R 为 0.83 时波动最大, 最大波动幅度为 7.01%; 标准差为 10% 时, 挥舞弯矩在 r/R 为 0.88 时波动最大, 最大波动幅度为 13.39%; 标准差为 15% 时, 挥舞弯矩在 r/R 为 0.88 时波动最大, 最大波动幅度为 19.33%. 风力机挥舞弯矩波动在叶根部分比较小, 在叶尖部分比较大, 主要因为弯矩计算受半径影响, 而载荷不确定性在叶片全长上变化不大.

图 8 为不同风速及标准差下风力机摆振弯矩不确定性对比. 三种标准差下摆振弯矩均值基本一致,

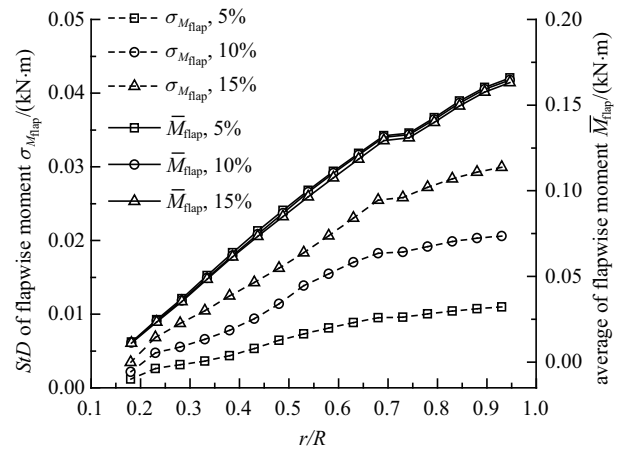


图 7 不同标准差下挥舞弯矩在叶片全长上的分布
Fig. 7 Distribution of flapwise moment on the full length of the blade under different standard deviations

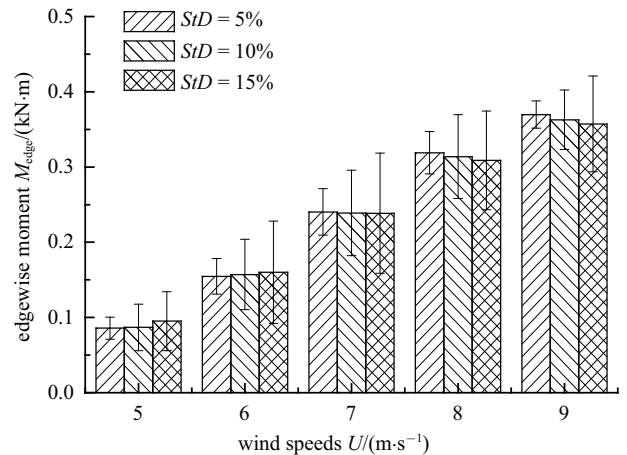


图 8 不同风速及标准差下叶根摆振弯矩不确定性
Fig. 8 Uncertainty of the edgewise moment of the blade root under different wind speeds and standard deviations

标准差越大摆振弯矩波动越大. 三种标准差下摆振弯矩波动均在风速为 7 m/s 时最大, 标准差为 5% 时最大波动幅度为 12.84%, 标准差为 10% 时最大波动幅度为 23.72%, 标准差为 15% 时最大波动幅度为 33.49%.

为进一步分析不确定性影响, 计算摆振弯矩在叶片全长上的分布, 由图 8 分析得到在风速为 7 m/s 时摆振弯矩的波动最大, 因此选择 7 m/s 计算.

图 9 为风速为 7 m/s 时不同标准差下摆振弯矩在叶片全长上的分布. 三种标准差下均值基本相同, 标准差越大摆振弯矩波动越大. 三种标准差下摆振弯矩均在 r/R 为 0.6~0.8 时波动最大, 标准差为 5% 时最大波动幅度为 13.32%, 标准差为 10% 时最大波动幅度为 25.16%, 标准差为 15% 时最大波动幅度为 35.18%.

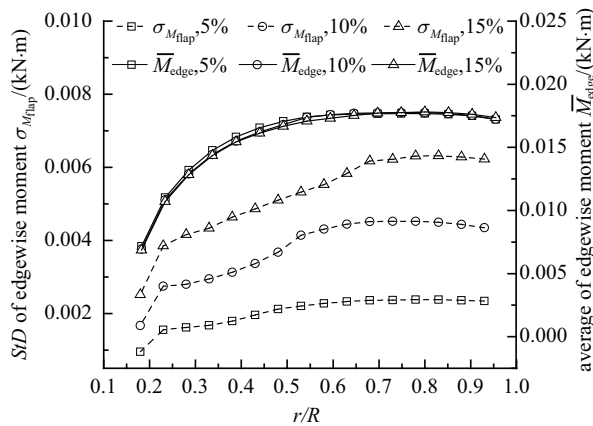


图 9 不同标准差下摆振弯矩在叶片全长上的分布
Fig. 9 Distribution of edgewise moment on the full length of the blade under different standard deviations

3.3 周向和轴向诱导因子

为进一步分析不确定性影响, 计算轴向诱导因子和周向诱导因子在叶片全长上分布. 参考文献 [29] 中给出了平均风速为 6.7 m/s 时轴向诱导因子实际测量值, 因此选择 6.7 m/s 进行计算.

图 10 为三种标准差下周向诱导因子不确定性在叶片全长分布对比. 三种标准差下均值基本相同, 在相同半径位置标准差越大, 周向诱导因子波动越大, 且越靠近叶根位置周向诱导因子波动越大. 三种标准差下, 周向诱导因子均在 r/R 为 0.18 时最大, 标准差为 5% 时最大波动幅度为 13.23%, 标准差为 10% 时最大波动幅度为 24.38%, 标准差为 15% 时最大波动幅度为 35.78%. 表明风轮叶片中部到叶尖位置流动较为稳定, 受不确定性影响较小, 而叶片根部靠近风

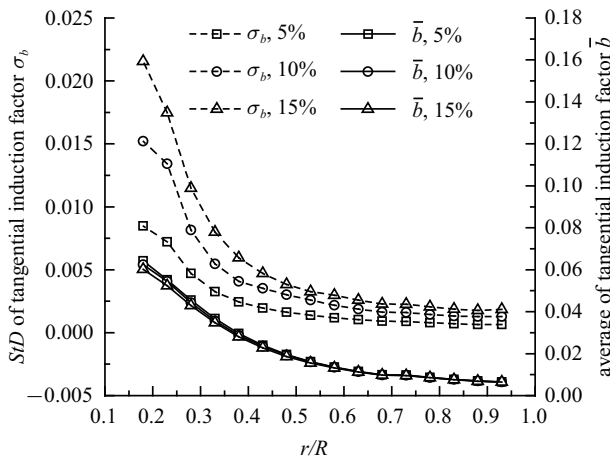


图 10 不同标准差下周向诱导因子不确定性分布
Fig. 10 Uncertainty distribution of tangential induction factor under different standard deviations

轮中心受风速不确定性影响较大, 可以在根部位置采取措施以改善不确定流动对风力机气动性能的影响.

图 11 为平均风速为 6.7 m/s 时, 三种标准差下轴向诱导因子不确定性在叶片全长分布对比. 在三种标准差下均值基本相同, 相同半径位置, 风速标准差越大轴向诱导因子波动越大. 标准差为 5% 时, 轴向诱导因子的波动在 r/R 为 0.23 时最大, 最大波动幅度为 4.71%; 标准差为 10% 时, 轴向诱导因子的波动在 r/R 为 0.38 时最大, 最大波动幅度为 7.42%; 标准差为 15% 时, 轴向诱导因子波动在 r/R 为 0.43 时最大, 最大波动幅度为 11.64%.

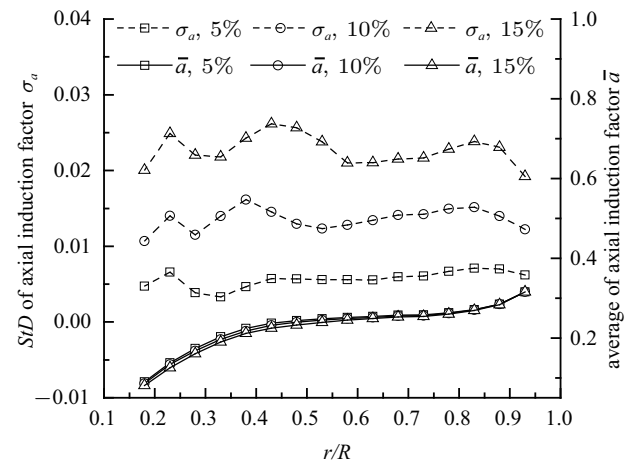


图 11 不同标准差下轴向诱导因子不确定性分布
Fig. 11 Uncertainty distribution of axial induction factor under different standard deviations

4 结论

基于修正叶素动量理论和非嵌入式概率配置点法, 建立风力机不确定气动分析模型, 获得风速不确定性对风力机功率和气动影响程度, 通过流动诱导叶片全长分布特性揭示不确定性在风力机叶片流向方向传播机制. 主要结论如下:

(1) 风速波动对风力机功率和气动影响显著. 在讨论风速范围内, 风速标准差由 0.05 倍增大至 0.15 倍均值, 功率和推力最大波动幅度分别由 13.44% 和 8.00% 增大至 35.11% 和 22.02%; 叶片挥舞弯矩和摆振弯矩最大波动幅度分别由 7.20% 和 12.84% 增大至 19.90% 和 33.49%.

(2) 风速标准差越大叶片弯矩波动越大. 风速标准差为 15% 时, 挥舞弯矩最大波动幅度为 19.33%, 摆

振弯矩最大波动幅度为 35.18%。风力机挥舞弯矩和摆振弯矩波动在叶根部分比较小在叶尖部分比较大, 主要因为弯矩计算受半径影响, 而载荷不确定性在叶片全长上变化不大。

(3) 风力机叶片周向气动诱导因子不确定性从叶根到叶尖逐渐减小, 在根部位置流动诱导受不确定因素影响最大。可以考虑在该部分采取流动控制措施降低叶片气动性能对不确定因素敏感程度。

参 考 文 献

- 何佳, 肖杨, 邓友汗等. 基于 BEM 的风力机叶片形变及气动性能. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9): 2513-2519 (He Jia, Xiao Yang, Deng Youhan, et al. Aeroelastic deformation and aerodynamic performance of wind turbine blades based on BEM. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(9): 2513-2519 (in Chinese))
- 李德源, 汪显能, 莫文威等. 非定常条件下风力机柔性叶片气弹耦合分析. 太阳能学报, 2017, 38(4): 966-975 (Li Deyuan, Wang Xianneng, Mo Wenwei, et al. Aeroelastic coupling analysis of flexible blades of wind turbine under unsteady conditions. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(4): 966-975 (in Chinese))
- Kabir IFSA, Ng EYK. Insight into stall delay and computation of 3D sectional aerofoil characteristics of NREL phase VI wind turbine using inverse BEM and improvement in BEM analysis accounting for stall delay effect. *Energy*, 2017, 120: 518-536
- Esfahanian V, Pour AS, Harsini I, et al. Numerical analysis of flow field around NREL Phase II wind turbine by a hybrid CFD/BEM method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 120: 29-36
- Arramach J, Boutammachate N, Abdelfattah B. Prediction of the wind turbine performance by using a modified BEM theory with an advanced brake state model. *Energy Procedia*, 2017, 118: 149-157
- Rajan A, Ponta FL. Aeroelastic analysis of the 3-dimensional interference patterns of wind-turbine rotors: The 3-D DRD-BEM model. *Renewable Energy Focus*, 2018, 26: 22-39
- Yang H, Shen WZ, Xu HR, et al. Prediction of the wind turbine performance by using BEM with airfoil data extracted from CFD. *Renewable Energy*, 2014, 70: 107-115
- Pinto RLUDf, Gonçalves BPF. A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory. *Renewable Energy*, 2017, 105: 625-636
- Kavari G, Tahani M, Mirhosseini M. Wind shear effect on aerodynamic performance and energy production of horizontal axis wind turbines with developing blade element momentum theory. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 368-376
- Guo SJ, Chen JH, Chiu CH. Fuzzy duration forecast model for wind turbine construction project subject to the impact of wind uncertainty. *Automation in Construction*, 2017, 81: 401-410
- 王多睿, 王维庆, 蔡鑫. 基于 NMPC-PID 的风力机独立变桨距控制策略研究. 太阳能学报, 2017, 38(9): 2520-2526 (Wang Duorui, Wang Weiqing, Cai Xin. Research on control strategy of individual pitch control of wind turbine base on NMPC-PID. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(9): 2520-2526 (in Chinese))
- 郝文星, 叶舟, 李春等. 基于柔性尾缘襟翼风力机翼型性能主动控制研究. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1339-1345 (Hao Wenxing, Ye Zhou, Li Chun, et al. Study of active control for wind turbine airfoil performance base on deformable trailing edge flap. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(5): 1339-1345 (in Chinese))
- 卢爽璋, 付思, 佟维妍. 风电机组变桨鲁棒控制. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(6): 627-631 (Lu Shixuan, Fu Xi, Tong Weiyan. Robust control for variable pitch of wind turbines. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2018, 40(6): 627-631 (in Chinese))
- 杨阳, 李春, 叶柯华等. 基于 HHT 方法的非稳定工况风力机结构动态响应时频特性分析. 振动与冲击, 2016, 35(21): 22-28 (Yang Yang, Li Chun, Ye Kehua, et al. Structural dynamic response characteristics of a wind turbine in time-frequency domain under non-stationary operating conditions based on HHT method. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(21): 22-28 (in Chinese))
- Yuan Y, Tang J. Adaptive pitch control of wind turbine for load mitigation under structural uncertainties. *Renewable Energy*, 2017, 105: 483-494
- 李焦赞, 高正红. 基于几何不确定性的翼型多目标稳健优化设计. 力学学报, 2011, 43(3): 611-615 (Li Jiaozan, Gao Zhenghong, Multi objective optimization methodology for airfoil robust design under geometry uncertainty. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(3): 611-615 (in Chinese))
- 赵轲, 高正红, 黄江涛等. 基于 PCE 方法的翼型不确定性分析及稳健设计. 力学学报, 2014, 46(1): 10-19 (Zhao Ke, Gao Zhenghong, Huang Jiangtao, et al. Uncertainty quantification and robust design of airfoil based on polynomial chaos technique. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(1): 10-19 (in Chinese))
- 徐林程, 王刚. 翼型风洞试验中不确定性分析的自动微分方法. 航空学报, 2014, 35(8): 2102-2111 (Xu Lincheng, Wang Gang. Uncertainty analysis of airfoil wind tunnel tests with automatic differentiation. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2014, 35(8): 2102-2111 (in Chinese))
- 郑宇宁, 邱志平, 黄仁等. 二元可变后缘翼型的鲁棒优化设计. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 897-903 (Zheng Yuning, Qiu Zhiping, Huang Ren, et al. Robust design optimization of a two-dimensional airfoil with deformable trailing edge. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(5): 897-903 (in Chinese))
- 乔晨亮, 许和勇, 叶正寅. 钝后缘风力机翼型的环量控制研究. 力学学报, 2019, 51(1): 135-145 (Qiao Chenliang, Xu Heyong, Ye Zhengyin. Circulation control on wind turbine airfoil with blunt trailing edge. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 135-145 (in Chinese))
- 李国强, 张卫国, 陈立等. 风力机叶片翼型动态试验技术研究. 力学学报, 2018, 50(4): 751-765 (Li Guoqiang, Zhang Weiguo, Chen Li, et al. Research on dynamic test technology for wind turbine blade airfoil. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 751-765 (in Chinese))
- 邓凯文, 陈海昕. 基于差分进化和 RBF 响应面的混合优化算法. 力学学报, 2017, 49(2): 441-455 (Deng Kaiwen, Chen Haixin. Hybrid optimization algorithm based on differential evolution and RBF response surface. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(2): 441-455 (in Chinese))

- brid optimization algorithm based on differential evolution and RBF response surface. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanic*, 2017, 49(2): 441-455 (in Chinese))
- 23 Keshavarzzadeh V, Ghanem RG, Tortorelli DA. Shape optimization under uncertainty for rotor blades of horizontal axis wind turbines. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 354: 271-306
- 24 Murcia JP, Réthoré PE, Dimitrov N, et al. Uncertainty propagation through an aeroelastic wind turbine model using polynomial surrogates. *Renewable Energy*, 2018, 119: 910-922
- 25 Antonini EGA, Romero DA, Amon CH. Improving CFD wind farm simulations incorporating wind direction uncertainty. *Renewable Energy*, 2019, 133: 1011-1023
- 26 Toft HS, Svenningsen L, Sørensen JD. Uncertainty in wind climate parameters and their influence on wind turbine fatigue loads. *Renewable Energy*, 2016, 90: 352-361
- 27 Horna JT, Krokstad JR, Leir BJ. Impact of model uncertainties on the fatigue reliability of offshore wind turbines. *Marine Structures*, 2019, 64: 174-185
- 28 Yan J, Zhang H, Liu YQ, et al. Uncertainty estimation for wind energy conversion by probabilistic wind turbine power curve modeling. *Applied Energy*, 2019, 239: 1356-1370
- 29 Giguere P, Selig MS. Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. National Renewable Energy Laboratory, 1999
- 30 李鸿秀, 朱瑞兆, 王蕊等. 不同地形风电场湍流强度日变化和年变化分析. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2327-2333 (Li Hongxiu, Zhu Ruizhao, Wang Rui, et al. Wind turbulence intensity of daily and yearly variation analysis in different kinds of terrain. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 35(11): 2327-2333 (in Chinese))