

文章编号:1000-582X(2011)07-001-07

变风速条件下风力发电机输入载荷及其影响因素分析

秦大同, 厉琦

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:建立了基于自回归(AR)方法的风场风速模型,求解得到了风速的变化时程;用Glauert方法求得了变风速下风力发电机的输入载荷——推力和扭矩随风速的变化时程;通过对载荷的统计分析得到了风力发电机的设计载荷谱和载荷雨流计数直方图;分析了变风速下风轮叶片主要参数对风力发电机输入载荷的影响规律:推力和扭矩载荷的均值随桨距角变化的响应明显,并随桨距角的增大而变小;推力的波动幅值随桨距角的增大先是增大然后减小,而扭矩的波动幅值则随桨距角的增大而单调减小;推力随叶片扭转角和攻角的变化响应明显而扭矩随扭转角和攻角变化的响应不明显。

关键词:AR 风速模型;风力发电机;动态载荷;雨流计数法;标准差

中图分类号:TH113.2

文献标志码:A

The input load and its influence factors of wind turbine based on variational wind speed

QIN Da-tong, LI Qi

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The auto regressive (AR) method is applied to build the model of wind speed in wind field, and with the model, the wind time-history is obtained. The Glauert method is used to calculate time-varying input load, such as the time histories of thrust and torque of the wind turbine under the condition of variational wind speed. Based on statistical analysis, the design loading spectrum and rain flow histogram of the loads are obtained. The effects of wheel blade parameters on the input load under the condition of variational wind speed are analyzed, and the average loads of thrust and torque are obviously affected by the pitch angle. When the pitch angle increases, the loads of thrust and torque both decrease, meanwhile the amplitude of thrust first increases then decreases, while the amplitude of torque decreases monotonously. The thrust is obviously affected by twist and attack angles of blade while the torque is less affected by the twist and attack angles of the blade. The results lay foundations for reliability design, load control of the wind turbine as well as the parameter optimum of the wheel blade aerofoil under the real wind condition.

Key words: AR wind model; wind turbines; dynamic loads; rain flow method; standard deviation

收稿日期:2011-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975294)

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事机械传动系统、车辆动力传动及其综合控制研究,
(E-mail)dtqin@cqu.edu.cn.

风能是一种洁净的可再生能源,具有永久性、清洁无污染等特点,且相对于其他可再生能源成本较低,因而越来越受到人们的重视,是最具发展前景的可再生能源之一。

在风力发电机的运行中,其恶劣的工作环境成为风力发电机,特别是风力发电机增速齿轮箱发生破坏的主要原因。据统计,增速齿轮箱是风力发电机故障率最高的部件,有的风场其损坏率高达 40%~50%^[1]。风力发电齿轮箱设计面临的最主要的困难是如何考虑和处理自然界的风速变化对风电齿轮箱的影响,并要求机组在不规律的交变和冲击载荷下能够正常运行 20 a。

在风工程中,风速模型通常是通过统计回归的方法来建立,这种方法通常用来研究风速在短时间内的变化情况,能够描述风速的主要统计性特征,因而获得了广泛的应用。

风力发电机叶片的空气动力学性能的合理运用对提高风力发电机的风能利用率,降低其所受的最大峰值载荷,提高风力发电机抵抗最大风载的能力有重要指导作用。Glauert^[2]方法是研究风力发电机的叶片空气动力学行为的一种重要方法,该方法先将叶片划分成若干个截面,通过分别计算叶片各个截面在风力作用下的微推力和微力矩,然后将各截面的力和力矩集成起来得到风作用在整个叶片上的合力和合力矩。以此为基础,计算得到表征叶片特性的系数来将定风速下叶片的力学性能推广到变风速下,通过这个系数计算出变风速下风轮叶片受到的推力载荷和扭矩载荷。

由于变风速引起的风轮叶片的载荷变化直接影响到风电机组的输入载荷,国内外众多的研究者采用不同的方法对风力发电机叶片上的载荷行为进行了研究。研究的重点在于采用何种分析方法分析叶片所受的力和力矩以及如何处理叶片所传递的变载荷。Henriques 等^[3]等应用逆解法得到了新型风机叶片,在设计该叶片的入流角时使其每个截面弦上都有相同的压力载荷。和以往传统叶片截面设计相比,该叶片在增加了最大升力,减小了前缘的低压峰值的同时也控制了叶片的软失速性能; Lanzafame 等^[4]基于叶素理论(BEM)计算了以恒定的标准转速运行时风力发电机的性能,以及变转速但在最大功率点运行时风力发电机的性能;任年鑫等^[5]运用 FLUENT 对大型风力机的主流商用二维翼型的气动性能进行了数值模拟,采用 $\kappa-\omega$ SST 湍流模型,考虑了大攻角下失速现象的影响,同时还进一步研究了翼型升力系数和阻力系数对其表面粗糙度的敏

感性。笔者以弄清风力发电机传动系统在变风速下的输入载荷变化规律及其影响因素为研究目的,在建立风场风速模型的基础上,研究了变风速下风轮叶片所承载荷的变化规律,讨论了叶片参数对载荷的影响,得到了载荷统计分布规律,为变风速条件下风力发电机的动载荷控制和传动系统的动力学研究与可靠性设计提供参考。

1 风速模型

1.1 风速模型的确定

变风速下风力机的载荷及影响因素考虑的主要问题之一是风速的模型问题,其次是载荷的计算问题。在风工程计算中,自回归模型法(AR)具有计算量小、速度快^[6]等优点,因此笔者选用 AR 法来建立风速模型。

在风工程计算中^[1]需要做如下假设:1)任意一点的平均风速不随时间改变;2)脉动风速时程是零均值平稳高斯过程;3)不同高度处的脉动风速作用同相。

自回归法(AR)中 M 个空间相关点的脉动风速时程为^[6]

$$\mathbf{v}(t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{v}(t-k\Delta t) + \mathbf{N}(t), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}(t)$ 、 $\mathbf{v}(t-k\Delta t)$ 分别为风速在时刻 t 和 $t-k\Delta t$ 的值, $\mathbf{v}(t)=[v_1(t), v_2(t), \dots, v_M(t)]$, Δt 是模拟风速时程的时间步长; p 为 AR 模型阶数; $\boldsymbol{\Psi}_k$ 为 AR 模型 M 阶自回归系数方阵, $k=1, 2, \dots, p$; $\mathbf{N}(t)$ 为独立随机过程向量,

$$\mathbf{N}(t) = \mathbf{L} \cdot \mathbf{n}(t). \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}(t)=[n_1(t), \dots, n_i(t), \dots, n_M(t)]^T$, $n_i(t)$ 是均方值为 0、方差为 1 且彼此相互独立的正态随机过程, $i=1, 2, \dots, M$; \mathbf{L} 为 M 阶下三角矩阵,由 M 阶协方差方阵 \mathbf{R}_N 的 Cholesky 分解求得:

$$\mathbf{R}_N = \mathbf{L} \cdot \mathbf{L}^T. \quad (3)$$

1.2 风速模型的求解

用 Yule-Walker 方法^[7]求解式(1)中的 $\boldsymbol{\Psi}_k$, 得到 $\boldsymbol{\Psi}_k$ 与风速自相关函数 R 的关系式

$$\mathbf{R}(j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{R}[(j-k)\Delta t], j = 1, 2, \dots, p, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(0) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{R}(k\Delta t) + \mathbf{R}_N, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}(j\Delta t)$ 为 $(p+1) \times M$ 阶自相关 Toeplitz 方阵;式(4)、(5)中的自相关矩阵 $\mathbf{R}(j\Delta t)$ 中的元素 $R_{ij}(\tau)$ 利用维纳辛钦定理求解,即

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^{\infty} S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot \tau) df, \quad (6)$$

式(6)中的 $S_{ij}(f)$ 为 i 点和 j 点之间的风速功率谱密度函数, 当 i 和 j 相同时, S_{ij} 为自谱密度函数, 取 Kaimal 谱^[8]

$$S(z, f) = \frac{200 f^* v^*}{f(1 + 50 f^*)^{5/3}}, \quad (7)$$

式中: $v^* = \frac{0.35 \cdot \overline{v(z)}}{\ln(z/z_0)}$;

$$f^* = \frac{fz}{\overline{v(z)}}; \frac{\overline{v(z)}}{v_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^a;$$

z_0 为地面粗糙长度; f 为频率; z 为离地面的高度; a 为地面粗糙系数; $\overline{v_{10}}$ 为 10 m 高度的基本风速。

当 i 和 j 不相同, S_{ij} 为互谱密度函数, 计算式为

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)} \cdot r_{ij}(f), \quad (8)$$

式中: $S_{ii}(f)$ 和 $S_{jj}(f)$ 是 Kaimal 谱在 i 点和 j 点自谱密度函数的值; $r_{ij}(f)$ 为 i 和 j 点的相干函数, 计算方法为

$$r_{ij} = \exp\left[\frac{-2f \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\overline{v(z_i)} + \overline{v(z_j)}}\right]. \quad (9)$$

式中 C_x, C_y, C_z 分别表示空间任意两点的左右、上下、前后的衰减系数, 分别取值为 16、6、10^[8]。

1.3 风速模拟

将式(6)代入式(4)、(5)求出 Ψ_k 和 R_N ; 然后根据式(3)、(2), 解出 $N(t)$ 并将 Ψ_k 和 $N(t)$ 代入式(1)即可解出水平脉动风速时程 $v(t)$ 。取初始时刻之前的风速为 0, 取模拟的时间间隔 $\Delta t = 0.1$ s; 一般情况下 4 阶 AR 模型的精度已经符合要求, 因此 $p = 4$; 地面类型为 B 类, 地面粗糙长度 $z_0 = 0.25$ m; 粗糙度系数的取值 $a = 0.2$; 10 m 高的标准风速取值为 $\overline{v_{10}} = 27$ m/s^[9], 模拟时长为 120 s, 根据以上条件模拟得到的风速时程如图 1 所示。

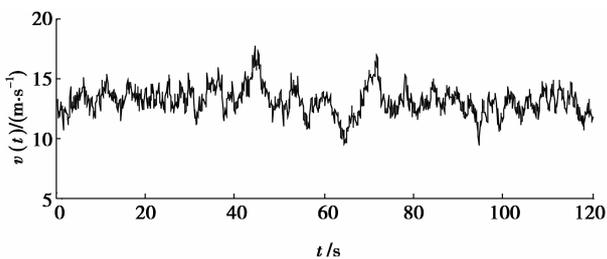


图 1 风速时程图

2 变风速下风轮叶片载荷的计算

2.1 风力机叶片的基本参数

根据工程中的常用算法^[10], 风轮半径 R 为

$$R = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho\pi v^3 C_{p0} \xi}}, \quad (10)$$

式中: 空气密度 $\rho = 1.25$ kg/m³; 风力机额定功率 $P_0 = 750$ kw; 设计风速 $v = 13$ m/s; 风力机增速箱效率 $\xi = 0.8$; 设计风能利用系数 $C_{p0} = 0.44$; 由此可得风轮半径 R 为 22 m。

通过计算叶片的外形尺寸^[11]得到叶片的最大弦长位于距旋转中心 1.5 m 处, 为 2.12 m, 叶片叶尖弦长 0.5 m, 叶片翼型选为 NACA63621。

根据叶片攻角应随叶片半径线性变化且在叶尖获得最佳攻角的原则, 由 xfoil 计算得到叶片叶尖的最佳攻角为 6°, 叶根的最佳攻角为 12.98°, 从而可得

$$\theta = 12.98 - 0.32r. \quad (11)$$

扭转角为^[12]

$$\beta_i = \theta_i \left(\frac{R}{r} - 1\right) - 0.3 \left(1 - \frac{r}{R}\right), \quad (12)$$

式中 θ_i 为叶尖处叶片的攻角。

2.2 叶片载荷的计算模型

采用葛劳渥特 (Glauert) 方法^[2]分析计算每一个截面上的微推力和微力矩, 并通过集成的方法得到整个叶片的推力和扭矩。

由于最大弦长在距旋转中心 1.5 m 处, 因此叶片主要承受空气动力的部分为距旋转中心 1.5 m 到 22 m 处, 将此部分沿翼展方向均分为 40 个截面, 分别编号, 叶片部分截面的参数见表 1。

表 1 叶片部分截面参数

截面编号	半径/m	攻角/(°)	扭转角/(°)	弦长/m
1	1.50	12.50	32.67	2.12
2	3.78	11.78	17.65	1.94
3	6.06	11.06	9.74	1.76
4	8.33	10.33	5.50	1.58
5	10.61	9.61	3.10	1.40
6	12.89	8.89	1.70	1.22
7	15.17	8.17	0.89	1.04
8	17.44	7.44	0.47	0.86
9	19.72	6.72	0.30	0.68
10	22.00	6.00	0.30	0.50

整个叶片受到的力和力矩为^[13]

$$dF = \frac{1}{8} \rho b \omega^2 l C_L \frac{\cos(I - \epsilon)}{\cos \epsilon} \frac{(1 + h)^2}{\cos^2 I} r^2 dr, \quad (13)$$

$$dM = \frac{1}{8} \rho b \omega^2 l C_{L_i} \frac{\sin(I_i - \epsilon_i)}{\cos \epsilon_i} \frac{(1+h_i)^2}{\cos^2 I_i} r_i^3 dr_i, \quad (14)$$

将式(13)、(14)用差分形式表示,并带入表中相关参数计算即可得叶片受到的力和力矩为

$$F = \sum_{i=1}^{40} \frac{1}{8} \rho b \omega^2 l_i C_{L_i} \frac{\cos(I_i - \epsilon_i)}{\cos \epsilon_i} \frac{(1+h_i)^2}{\cos^2 I_i} r_i^2 \Delta r_i, \quad (15)$$

$$M = \sum_{i=1}^{40} \frac{1}{8} \rho b \omega^2 l_i C_{L_i} \frac{\sin(I_i - \epsilon_i)}{\cos \epsilon_i} \frac{(1+h_i)^2}{\cos^2 I_i} r_i^3 \Delta r_i, \quad (16)$$

式中: I_i 为截面*i*处的倾角,计算式为

$$I_i = \text{acot} \left(\lambda_i \frac{1+h_i}{1+k_i} \right); \quad (17)$$

C_{L_i} 、 l_i 、 h_i 、 k_i 、 r_i 分别为截面*i*处的升力系数、弦长、周向诱导速度、轴向诱导速度和半径; $\tan \epsilon_i = C_d/C_L$ 。

2.3 变风速下叶片载荷的计算

变风速下载荷计算与定风速时载荷计算的最大区别是风速的变化带来的叶片载荷(即传动系统的输入载荷)的变化,这里将变化的风速处理成不同时刻,在很短时间间隔内幅值恒定的风速,并按以下过程计算叶片载荷:

1)计算时刻*t*的风速对应的风力发电机的叶尖速比

$$\lambda_t = \frac{\omega R}{v_t}. \quad (18)$$

2)计算与叶尖速比 λ_t 对应的叶片载荷系数,即推力系数 C_f 、扭矩系数 C_m 和功率系数 C_p ^[11]。

为了便于计算,同时更好地表示叶片特性,首先计算叶片的无量纲系数即载荷系数,然后再计算叶片载荷。

由式(15)、(16)、(17)和动量定理,将*k*和*h*单独表示出来,并令:

$$G_i = \frac{1-k_i}{1+k_i} = \frac{C_{L_i} b l_i \cos(I_i - \epsilon_i)}{8 \pi r_i \cos \epsilon_i \sin^2 I_i}, \quad (19)$$

$$E_i = \frac{h_i - 1}{h_i + 1} = \frac{C_{L_i} b l_i \sin(I_i - \epsilon_i)}{4 \pi r_i \cos \epsilon_i \sin 2I_i}, \quad (20)$$

$$\text{则 } k_t = \frac{1-G_t}{1+G_t}, h_t = \frac{1+E_t}{1-E_t}. \quad (21)$$

对式(19)、(20)和(21)进行无量纲化处理,并将式(18)和(21)分别带入式(22)、(23)和(24)便可求得叶片的载荷系数如下:

推力系数

$$C_f = 2 \int_0^1 (1-k_t^2) \frac{r}{R} d\left(\frac{r}{R}\right), \quad (22)$$

力矩系数

$$C_m = 2 \int_0^1 \lambda_t (1+k_t) (h_t - 1) \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right), \quad (23)$$

功率系数

$$C_p = c_m \lambda_t. \quad (24)$$

3)将变风速和载荷系数代入式(25)、(26)、(27)便可计算得到传动系统的输入载荷。

$$F = \frac{1}{2} \rho S v_1^2 C_f, \quad (25)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho S v_1^2 R C_m, \quad (26)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \cdot C_p, \quad (27)$$

式中: F 、 M 、 P 分别是风力发电机传动系输入轴的推力、扭矩和功率; v_1 为短时时间间隔内的恒定风速。

采用如上计算方法,利用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真计算,得出与图 1 所示的风速时程相对应的载荷时程如图 2、3 所示。

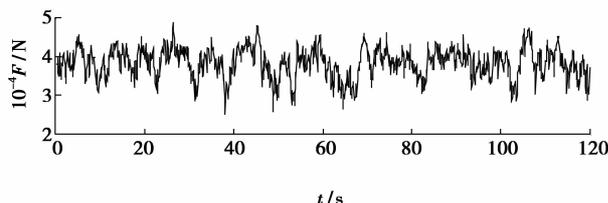


图 2 推力变化时程图

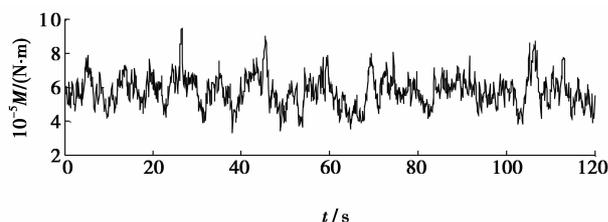


图 3 扭矩变化时程图

3 载荷统计与影响参数分析

3.1 载荷的统计分析

对推力载荷和扭矩载荷时程进行统计分析,将载荷数据的数值范围均分为 3 个区间,取每个区间的中心点为分段平均值,计算载荷时程内各区间含有的载荷数量占总载荷数的百分比,以此方法统计得到分段平均载荷所占统计载荷时程的比例,得出图 4、5 所示的分段平均推力、扭矩的统计图。用雨流计数法^[14]来考察推力和扭矩谱载荷的幅值、均值和频次之间的关系,其结果如图 6、7 所示。

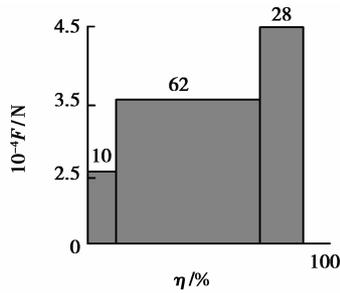


图 4 分段平均推力统计图

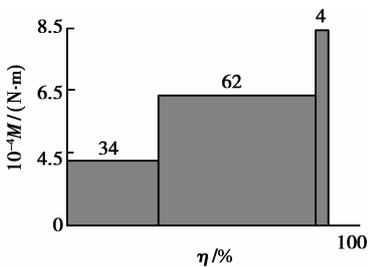


图 5 分段平均扭矩统计图

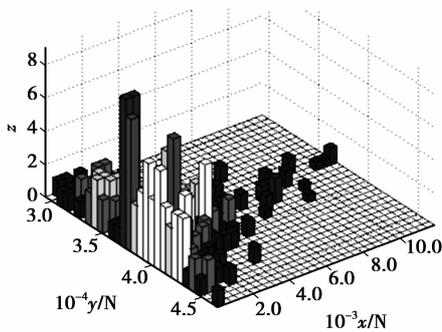


图 6 推力载荷的雨流计数直方图

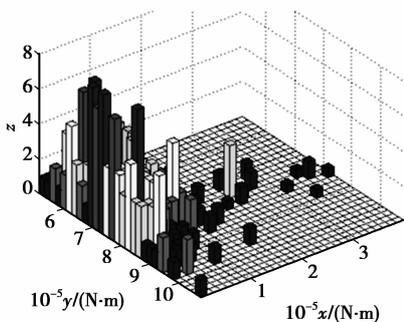


图 7 扭矩载荷的雨流计数直方图

图 4、5 所示的载荷的统计图表示在所讨论的运行时程中,各统计平均载荷占总载荷的百分比,以此表明统计载荷的组成形式。例如,图 4 中平均推力为 3.68×10^4 N 的载荷占载荷的百分比为 62%,是推力载荷中的主要部分,其他部分所占百分比比较小,

分别为 10% 和 28%;图 5 中平均扭矩为 8.27×10^4 N·m 的载荷占时程的百分比为 62%,是扭矩载荷的主要部分,其他部分所占百分比比较小,分别为 34% 和 4%。按以上方法得到的载荷统计图就是通常用于风力发电机设计的载荷谱。

在由雨流计数法得到的载荷三维直方图(如图 6、7)中, x 坐标表示载荷偏离其均值的大小, y 坐标表示时程中相邻两个载荷的均值的分布情况, z 坐标表示频数的分布情况。图 6、7 表明推力和扭矩的均值分布为高斯分布,载荷波动的幅值也呈高斯分布。

3.2 桨距角对载荷的影响

风力发电机的载荷受到了包括风速、叶片桨距角、叶片攻角和叶片扭转角等参数的影响,这里在其他参数不变的情况下讨论叶片桨距角对推力载荷和扭矩载荷的影响。

在桨距角的变化范围内($0^\circ \sim 45^\circ$),每改变一个桨距角计算叶片相应的载荷时程,最后得到若干个载荷随桨距角变化的时间历程。

桨距角在 0° 、 3° 、 5° 、 10° 时,推力载荷和扭矩载荷时程的变化情况如图 8、10 所示。从图 8、10 中可知随着桨距角的增大,推力和扭矩都变小,但各自载荷波动幅值的变化规律却不相同。由于载荷的标准差反应了载荷的波动情况,因此用标准差的变化情况来描述载荷幅值的波动,其结果如图 9 和图 12 所示。

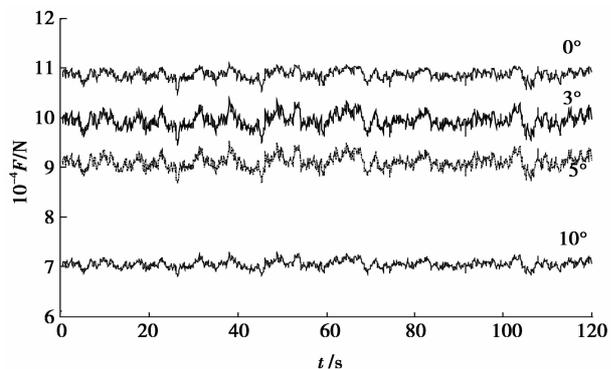


图 8 不同桨距角时推力载荷的比较

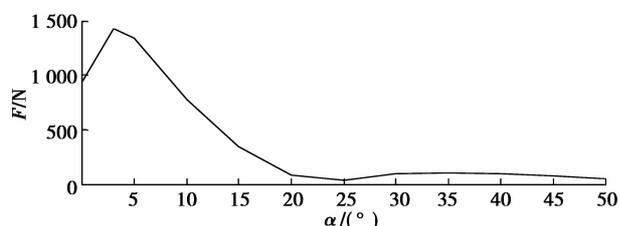


图 9 推力标准差随桨距角的变化

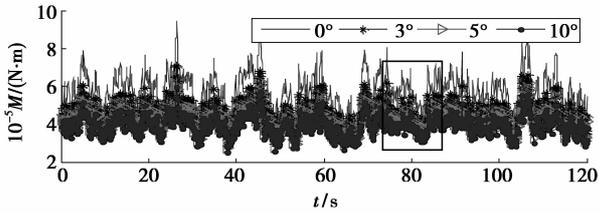


图 10 不同桨距角时扭矩载荷的比较

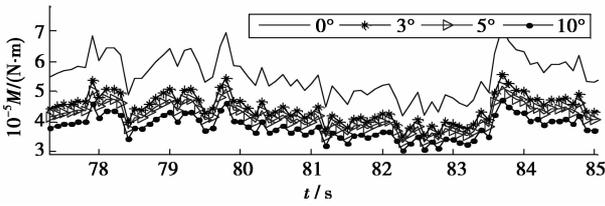


图 11 不同桨距角时扭矩载荷比较的局部放大图

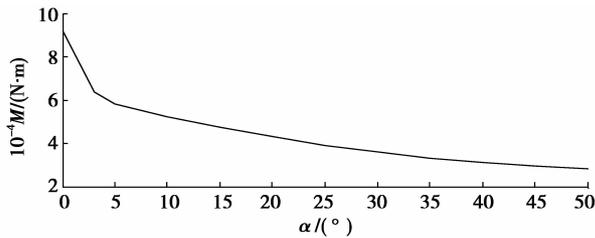


图 12 扭矩标准差随桨距角的变化

由图 9、12 可见,随着桨距角的增大,推力的波动幅值先变大然后再变小,在桨距角为 3° 时推力的波动幅值达到最大值;扭矩的波动幅值则随桨距角的增大单调减小。

3.3 叶片的几何参数对载荷的影响

这里主要考虑叶片的攻角和扭转角对载荷的影响。在保持叶片其他参数不变的情况下,分别单独改变叶片的扭转角和攻角,计算叶片的载荷时程,结果分别如图 13-16 所示。

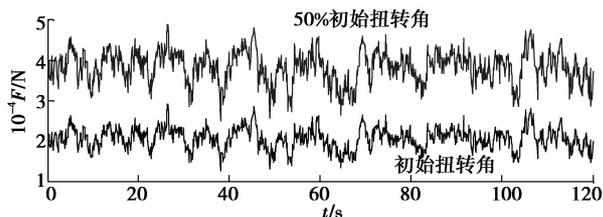


图 13 扭转角改变时的推力变化

由图 13、14 可知,叶片扭转角减小时推力和扭矩都增大,但扭矩的变化量较小;推力和扭矩的波动幅值随扭转角变化不大。

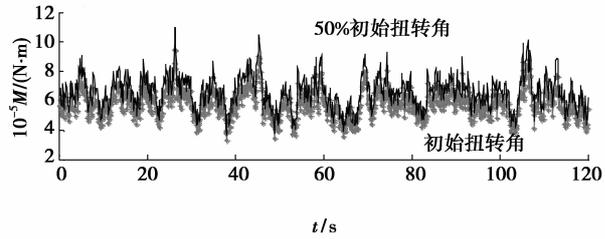


图 14 扭转角改变时的扭矩变化

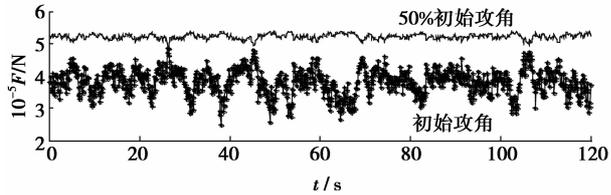


图 15 攻角改变时的推力变化

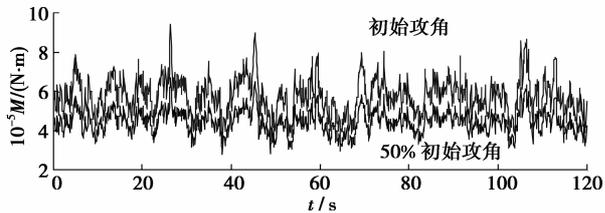


图 16 攻角改变时的扭矩变化

由图 15、16 可知,攻角对推力影响较大,对扭矩影响较小。当攻角减小时,推力增大且其波动幅值减小;当攻角减小时扭矩变小但变化不大,且波动幅值变化也较小。

4 结论

1) 采用自回归(AR)模型模拟了风场的风速变化,建立了叶片载荷模型,求得了变风速下叶片的载荷-时间历程。在此基础上通过统计分析获得了风力发电机在变风速条件下的设计载荷谱,以及载荷波动幅值、均值和频次的关系。研究了桨距角和叶片几何参数对风力发电机输入载荷的影响规律,得到了可供叶片翼型参数设计和输入载荷控制作参考的结论。

2) 风力发电机增速齿轮箱的输入载荷随风速的变化而变化,输入载荷时间历程的标准差反映了输入载荷幅值的波动情况,而输入载荷时间历程的均值则反映了输入载荷随风速大小变化的总体趋势。风力发电机增速箱的输入推力和输入扭矩的均值均

随桨距角的增大而变小,输入推力的波动幅值随桨距角的增大先是增大然后减小,输入扭矩的波动幅值则随桨距角的增大单调减小。

3) 推力随叶片扭转角和攻角的变化响应明显而扭矩随扭转角和攻角变化的响应不明显。在扭转角和攻角变小时,推力都变大但推力波动幅值受扭转角影响小,受攻角影响大。

参考文献:

- [1] 闫凌宇. 国内风电产业概况和存在问题的初步分析[J]. 电气工业, 2008(8): 12-14.
YAN LING-YU. Preliminary analysis of domestic wind power industry situation and existing problems [J]. China Electrical Equipment Industry, 2008(8): 12-14.
- [2] PETERS D A. Two-dimensional incompressible unsteady airfoil theory: an overview [J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(3): 295-312.
- [3] HENRIQUES J C C, MARQUES DA SILVA F, ESTANQUEIRO A I, et al. A design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method [J]. Renewable Energy, 2009, 34 (12): 2728-2734.
- [4] LANZAFAME R, MESSINA M. Horizontal axis wind turbine working at maximum power coefficient continuously [J]. Renewable Energy, 2010, 35 (1): 301-306.
- [5] 任年鑫, 欧进萍. 大型风力机二维翼型气动性能数值模拟[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1087-1091.
REN NIAN-XIN, OU JIN-PING. Numerical simulation for pneumatic characteristics for two-dimensional airfoils large wind turbine [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(8): 1087-1091.
- [6] 舒新玲, 周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2009, 9(4): 27-33.
SHU XIN-LING, ZHOU DAI. AR model of wind speed time series and its rapid implementation [J]. Spatial Structures, 2009, 9(4): 27-33.
- [7] SCHLOGL A. A comparison of multivariate autoregressive estimators [J]. Signal Processing, 2006, 86(9): 2426-2429.
- [8] 刘小会, 严波, 林雪松, 等. 500 kV 超高压输电线路风偏数值模拟研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 244-249.
LIU XIAO-HUI, YAN BO, LIN XUE-SONG, et al. Numerical simulation of windage yaw of 500kV UHV transmission lines [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 244-249.
- [9] 李杰, 张琳琳. 脉动风速功率谱与随机 Fourier 幅值谱的关系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24 (4): 363-369.
LI JIE, ZHANG LIN-LIN. A study on the relationship between turbulence power spectrum and stochastic fourier amplitude spectrum [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24 (4): 363-369.
- [10] 刘万坤, 张志英, 李银凤, 等. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 杨瑞, 李仁年, 韩伟, 等. 一种风力机风轮设计和优化方法研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 46-50.
YANG RUI, LI REN-NIAN, HAN WEI, et al. Study on an approach for wind rotor design and optimization [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2008, 27(4): 46-50.
- [12] MURUA J, PALACIOS R, PEIRO J. Camber effects in the dynamic aeroelasticity of compliant airfoils [J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(4): 527-543.
- [13] LANZAFAME R, MESSINA M. Fluid dynamics wind turbine design: critical analysis, optimization and application of BEM theory [J]. Renewable Energy, 2007, 32 (14): 2291-2305.
- [14] NIESLONY A. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(8): 2712-2721.

(编辑 张 苹)