

风力发电机旋转样本谱及疲劳寿命预测

贺广零

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092, hglcool@126.com)

摘要: 为了考虑桨叶旋转效应, 准确进行风力发电机疲劳寿命预测, 提出了基于旋转样本谱的风力发电机疲劳寿命预测模型. 借助 Fourier 变换, 推导了考虑旋转效应的旋转样本谱, 并与 Von Karman 谱(一种固定点紊流风谱)进行比较. 在旋转样本谱的基础上, 提出了源于 Palmgren-Miner 线性损伤准则的风力发电机疲劳寿命预测模型, 并以 1.25 MW 风力发电机为例进行疲劳寿命分析. 结果表明, 与固定点紊流风谱相比, 旋转样本谱的能量分布发生了根本变化, 其能量由低频向高频移动, 在高频段曲线会出现多峰情况; 基于旋转样本谱的疲劳寿命分析更接近实际情况, 而基于 Von Karman 谱进行风力发电机疲劳寿命预测不够精确, 且偏于不安全.

关键词: 风力发电机; Fourier 变换; 旋转样本谱; Palmgren-Miner 线性损伤准则; 疲劳寿命预测

中图分类号: TK8

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0816-04

Rotationally sampled spectrum and fatigue life prediction of wind turbine system

HE Guang-ling

(Dept. of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China, hglcool@126.com)

Abstract: In order to take the rotating effect into consideration and predict the fatigue life of wind turbine system exactly, a fatigue life prediction model based on the rotationally sampled spectrum is proposed in this paper. Firstly, the rotationally sampled spectrum taking the rotating effect into consideration is deduced through the Fourier transformation and compared with the Von Karman spectrum (fixed point spectrum). Based on the rotationally sampled spectrum, a fatigue life prediction model which derives from the Palmgren-Miner (P-M) linear damage model is provided. Then the fatigue life analysis of a 1.25 MW wind turbine system is carried out. The results show that the energy of the rotationally sampled spectrum transforms significantly from the low frequency region to the high frequency region. Besides, multi-peaks also appear in the high frequency region because of the energy shift. The fatigue life prediction model based on the rotationally sampled spectrum can predict the fatigue life and evaluate the security of the wind turbine structure more exactly compared with the one based on the Von Karman spectrum, which will overestimate the fatigue life and is unsafe for the fatigue life prediction of wind turbines.

Key words: wind turbine; Fourier transformation; rotationally sampled spectrum; Palmgren-Miner linear damage model; fatigue life prediction

作为目前最为成熟的新型可再生能源, 风能在世界范围内获得了广泛应用. 近年来, 风力发电

机桨叶疲劳及其可靠度问题引起人们的高度关注^[1]. 从整体上看, 现有的风力发电机疲劳寿命预测都基于固定点紊流风谱, 没有考虑桨叶旋转效应的影响^[2-5].

为了准确进行疲劳寿命预测, 本文首先提出了考虑桨叶旋转效应的紊流风速谱(旋转样本谱), 然后基于旋转样本谱提出了风力发电机疲劳寿命预测模型, 并对 1.25 MW 的风力发电机进

收稿日期: 2008-10-17.

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

作者简介: 贺广零(1982—), 男, 博士.

行疲劳寿命分析.

1 固定点紊流风谱

固定点紊流风谱是指某固定点处的紊流风谱,也就是没有考虑桨叶旋转效应的紊流风谱. 固定点紊流风谱是风能技术领域的特殊提法,与下文提出的旋转样本谱相对应,其本质与风工程中的紊流风谱是一致的. 常见的固定点紊流风谱有 Von Karman 谱^[6]、Kaimal 谱^[7]、Harris 谱^[8]、Davenport 谱^[9]等,本文在分析过程中采用了物理机制较为明确的 Von Karman 谱:

$$\frac{S_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{4L_v}{v_s [1 + 70.8(fL_v/v_s)^2]^{5/6}} \tag{1}$$

式中: σ_v 为风速标准差; L_v 为积分尺度; v_s 为平均风速.

对式(1)进行逆 Fourier 变换,可推得与 Von Karman 谱对应的自相关函数为

$$k_v(\tau) = \frac{2\sigma_v^2}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{\tau/2}{T'}\right)^{1/3} K_{1/3}\left(\frac{\tau}{T'}\right). \tag{2}$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_{1/3}(x)$ 为第二类修正 Bessel 函数,阶数 $\nu = 1/3$; T' 与积分尺度 L_v 的关系为^[10]

$$T' = \frac{\Gamma(1/3)}{\Gamma(5/6)} \frac{L_v}{\sqrt{\pi} v_s} \approx 1.34 \frac{L_v}{v_s}. \tag{3}$$

2 旋转样本功率谱

与固定点紊流风谱不同的是,旋转样本谱是考虑了桨叶旋转效应的紊流风谱. 在图 1 中, OAC 确定的平面为风轮平面,点 A 和点 C 分别是 Q 点在时间段 τ 内起始时刻和终止时刻所对应的位置. 点 B 为风轮平面外一点,位于点 C 的上风向距离处. 显然, BC 垂直于风轮平面. 由泰勒的冻结流假设 (Taylor's frozen-flow hypothesis) 可知, C 点在 $t = \tau$ 时刻的瞬时风速与上风向 $v_s\tau$ 处的 B 点在 $t = 0$ 时刻的瞬时风速相等. 因此, A 点和 C 点(Q 点在不同时刻的位置)的自相关函数可转化为 A 点和 B 点在同一时刻的互相关函数.

在图 1 中,将速度 v_A 沿 BA 方向和垂直于 BA 方向进行分解,可得到平行于 BA 方向速度分量 $v_A^{\parallel}$ 和垂直于 BA 方向的速度分量 $v_A^{\perp}$. 同理,对速度 v_B 进行分解可得到 $v_B^{\parallel}$ 和 $v_B^{\perp}$. 由 Bachelor(1953) 的研究成果可知,如果湍流是均匀且各向同性的,则顺风向风速相关函数 $k_v(s,0)$ 可表示为^[11]

$$k_v(s,0) = [k_L(s) - k_T(s)] \left(\frac{s_1}{s}\right)^2 + k_T(s).$$

式中: $k_L(s)$ 为 $v_A^{\parallel}$ 和 $v_B^{\parallel}$ 之间的相关函数; $k_T(s)$ 为

垂直于 BA 方向上速度分量 $v_A^{\perp}$ 和 $v_B^{\perp}$ 之间的相关函数, s 为矢量 BA .

已知桨叶的转速为 Ω , BC 之间的距离为 $s_1 = v_s\tau$, 则叶轮平面上 AC 之间的距离为 $2r\sin(\Omega\tau/2)$, AB 之间的距离为

$$s^2 = v_s^2\tau^2 + 4r^2\sin^2(\Omega\tau/2).$$

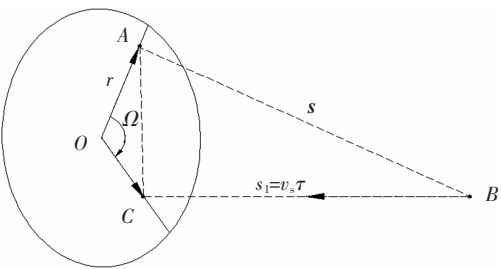


图 1 风轮平面几何关系

利用上述几何关系,相关函数 $k_v(s,0)$ 可改写为

$$k_v(s,0) = k_L(s) \left(\frac{v_s\tau}{s}\right)^2 + k_T(s) \left[1 - \left(\frac{v_s\tau}{s}\right)^2\right] = k_L(s) \left(\frac{v_s\tau}{s}\right)^2 + k_T(s) \left[\frac{2r\sin(\Omega\tau/2)}{s}\right]^2. \tag{4}$$

对于不可压缩气流, Bachelor(1953) 同时还给出了以下关系式^[11]:

$$k_T(s) = k_L(s) + \frac{s}{2} \frac{dk_L(s)}{ds}. \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)中,有

$$k_v(s,0) = k_L(s) + \frac{s}{2} \frac{dk_L(s)}{ds} \left[\frac{2r\sin(\Omega\tau/2)}{s}\right]^2. \tag{6}$$

当矢量 s 指向顺风向时, BA 方向风速相关函数 $k_L(s)$ 将与顺风向风速相关函数 $k_v(s_1)$ 重合,而 $k_v(s_1)$ 等于固定点自相关函数 $k_v(\tau)$, 则可根据 $k_v(\tau)$ 来确定 $k_L(s_1)$ 的表达式. 依据式(2),又有关系式 $\tau = s_1/v_s$, 相关函数 $k_L(s_1)$ 可表示为

$$k_L(s_1) = \frac{2\sigma_v^2}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{s_1/2}{T'v_s}\right)^{1/3} K_{1/3}\left(\frac{s_1}{T'v_s}\right).$$

假设湍流是各向同性的,则 $k_L(s)$ 与矢量 s 的方向无关,结合公式(3)有

$$k_L(s) = \frac{2\sigma_v^2}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{s_1/2}{T'v_s}\right)^{1/3} K_{1/3}\left(\frac{s_1}{T'v_s}\right) = \frac{2\sigma_v^2}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{s/2}{1.34L_v}\right)^{1/3} K_{1/3}\left(\frac{s}{1.34L_v}\right). \tag{7}$$

将式(7)代入到式(6)中,可得到旋转桨叶上半径为 r 的点顺风向风速自相关函数 $k_v^0(r,\tau)$:

$$k_v^0(r,\tau) = k_v(s,0) = \frac{2\sigma_v^2}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{s/2}{1.34L_v}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

$$\left[K_{1/3} \left(\frac{s}{1.34L_v} \right) - \frac{s}{2(1.34L_v)} K_{2/3} \cdot \left(\frac{s}{1.34L_v} \right) \left(\frac{2r \sin(\Omega\tau/2)}{s} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

对式(8)进行 Fourier 变换即可得到旋转样本谱函数 $S_v^0(f)$:

$$S_v^0(f) = 4 \int_0^\infty k_v^0(r, \tau) \cos 2\pi f \tau d\tau. \quad (9)$$

式中: $S_v^0(f)$ 为单边紊流风速功率谱.

因相关函数 $k_v^0(r, \tau)$ 为偶函数, 故有

$$k_v^0(r, \tau) = k_v^0(r, -\tau),$$

则式(9)可改写为

$$S_v^0(f) = 2 \int_{-\infty}^\infty k_v^0(r, \tau) \cos 2\pi f \tau d\tau. \quad (10)$$

对较大的 τ 而言, $k_v^0(r, \tau)$ 会趋于零, 所以首先可将积分范围缩小为 $[-T/2, T/2]$. 不妨假设 $k_v^0(r, \tau)$ 的变化周期为 T , 在 $\tau > T/2$ 时的范围内 $k_v^0(r, \tau)$ 等于 $k_v^0(r, T - \tau)$, 故积分范围可改写为 $[0, T]$. 此时, 式(10)可转换为

$$S_v^0(f) = 2 \int_0^T k_v^{*0}(r, \tau) \cos 2\pi f \tau d\tau. \quad (11)$$

式中: $k_v^{*0}(r, \tau)$ 可定义为

$$\begin{cases} k_v^{*0}(r, \tau) = k_v^0(r, \tau), & 0 \leq \tau \leq T/2; \\ k_v^{*0}(r, \tau) = k_v^0(r, T - \tau), & \tau > T/2. \end{cases}$$

由于无法获得式(11)的解析表达式, 则可对其进行离散化求解:

$$S_v^0(f_k) = 2 \left[\frac{T}{N} \sum_{p=0}^{N-1} k_v^{*0} \left(r, p \frac{T}{N} \right) \cos \left(2\pi \cdot \frac{k}{T} \cdot p \frac{T}{N} \right) \right].$$

式中: $f_k = k/T$, $\tau = pT/N$, $\Delta\tau = T/N$.

3 疲劳寿命预测模型

多数疲劳损伤曲线是依据等幅激励实验得出的. 当前工程上应用较为广泛的是 Palmgren-Miner 提出的线性疲劳累积损伤准则^[12], 本文的疲劳寿命预测模型亦基于该准则而建立. 依据 Palmgren-Miner 线性损伤准则, 对于 N 个时间段中的任意一个时间段而言, 如果应力幅值为 ΔS_i , n_i 周这样强度的激励造成的试件总损伤度为

$$D = \sum_{i=1}^N n_i \left(\frac{\Delta S_i}{S_1} \right)^m.$$

式中: 参数 S_1 和 m 依据材料的 $S-N$ 曲线确定.

如果试件危险部位所产生的动力响应 $X(t)$ 是一个均值为零的高斯随机过程, 其幅值可近似认为服从 Rayleigh 分布^[13], 则总的期望损伤度为

$$E\{D\} = \nu_0 \left(\frac{\Delta S}{S_1} \right)^m. \quad (12)$$

式中: 循环次数通过 ν_0 来体现,

$$\nu_0 = \frac{\sqrt{\lambda_2/\lambda_0}}{2\pi}.$$

式中: λ_2 、 λ_0 分别为第 2 阶、第 0 阶谱矩, 而第 k 阶谱矩可以统一表示为

$$\lambda_k = 4\pi \int_0^\infty (2\pi f)^k S_x(f) df.$$

式中: $S_x(f)$ 是基于 Von Karman 谱 $S_u(f)$ 或者旋转样本谱 $S_u^0(f)$ 经过随机动力分析获得的响应谱^[14]. Wirsching 和 Light 的研究表明, 式(12)中等效应力幅值 ΔS 可表示为^[14]

$$\Delta S = g(\alpha, m) 2\sqrt{2} \sigma_x \Gamma(1+m)^{1/m}.$$

式中: 标准差 $\sigma_x = \sqrt{\lambda_0}$; $g(\alpha, m)$ 是一个经验修正函数^[15],

$g(\alpha, m) = 1.0 + (0.66 - 0.045m)(\alpha - 1)$; α 为材料参数,

$$\alpha = \nu_0/\nu_m.$$

ν_m 可定义为^[16]:

$$\nu_m = \frac{\sqrt{\lambda_4/\lambda_2}}{2\pi}.$$

此时, 风力发电机疲劳寿命可由下式确定:

$$T = \frac{D_{\text{failure}}}{\sum_i p_i E\{D_i\}}.$$

式中: D_{failure} 是破坏时的损伤度, p_i 是第 i 荷载步的持时权重.

4 算 例

以典型的 1.25 MW 三桨叶变桨距型风力发电高塔系统为例进行分析. 已知风力发电机的桨叶半径 R 为 28 m, 转速 Ω 为 30 r/min, 额定风速为 16 m/s, 切入风速为 4 m/s, 切出风速为 25 m/s, 轮毂高度 50 m, 地面粗糙度 0.01 m. 根据 IEC61400-1^[17], 积分长度 L_v 取为 73.5 m. 风力发电机桨叶材质为钢材, 由 $S-N$ 曲线可确定参数 $m = 5.5$, $S_1 = 1460$ MPa. 基于上述参数则可借助 Matlab 软件进行旋转样本功率谱计算和风力发电机疲劳寿命预测. 图 2 是旋转样本谱与经典紊流风谱 Von Karman 谱的比较(平均风速取 12 m/s), 不难发现, 旋转样本谱的能量分布发生了根本的变化, 其能量由低频向高频移动, 在高频段曲线会出现多峰情况. 图 3 为风力发电机桨叶疲劳寿命分析结果, 分析点距离轮毂中心 1.5 m 处. 由图 3 可知, 基于旋转样本谱的疲劳寿命预测值远远小于基于 Von Karman 谱的值, 前者与后者之比大致为 1/10. 以平均风速为 21 m/s 的运行情况为例, 基于旋转样本谱的疲劳寿命预测值为

59 101 h(6.75 a),而基于 Von Karman 谱的预测值为 573 866 h(65.51 a). 由于风力发电机设计要求使用寿命为 20 a^[17],故前者认为此初步设计是不安全的,而后者则完全相反. 之所以会出现截然相反的结论,是因为基于旋转样本谱的疲劳寿命分析不仅考虑了脉动风速导致的应力幅值变化,而且还考虑了旋转桨叶位置变化(桨叶在不同高度处承受的风压不一样)导致的应力幅值变化. 显然,基于旋转样本谱的疲劳寿命分析更接近实际情况,基于 Von Karman 谱等固定点紊流风谱进行风力发电机疲劳寿命预测不够精确,且偏于危险.

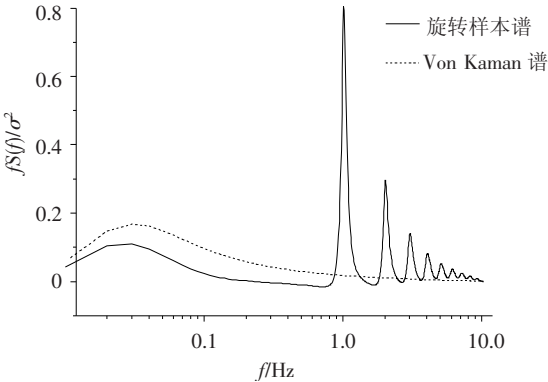


图2 旋转样本谱与 Von Karman 谱的比较

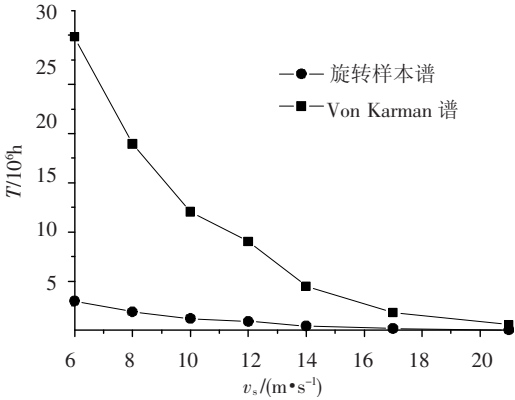


图3 风力发电机疲劳寿命预测

5 结 论

1)推导了考虑了桨叶旋转效应的紊流风谱(旋转样本谱). 与固定点紊流风谱相比,旋转样本谱的能量分布发生了根本的变化,其能量由低频向高频移动,但总能量保持不变. 同时,在高频段曲线会出现多峰情况.

2)提出了基于旋转样本谱的疲劳寿命预测模型. 研究表明,基于旋转样本谱的疲劳寿命分析更接近实际情况,基于 Von Karman 谱等固定点紊流风谱进行风力发电机疲劳寿命预测不够精确,且偏于不安全. 因此,在进行风力发电机疲劳寿命分析时应采用旋转样本谱.

参考文献:

[1] BURTON T, SHARPE D, JENKINS N, *et al.* Wind energy handbook [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2001:287 – 293.

[2] VEERS P S. Simplified fatigue damage and crack growth calculations for wind turbines [C]//Proceedings of the Eighth ASME Wind Energy Symposium. Texas: ASME, 1989:133 – 140.

[3] SUTHERLAND H J. Frequency domain analysis of the fatigue loads on typical wind turbine blades [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1996, 118(4): 204 – 211.

[4] SUTHERLAND H J. On the fatigue analysis of wind turbines [R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 1999.

[5] DICK VELDKAMP. Chance in wind energy: a probabilistic approach to wind turbine fatigue design [D]. [S.l.]: Delft University of Technology, 2006.

[6] VON KARMAN. Progress in the statistical theory of turbulence [J]. National Academy of Sciences, 1948, 34 (11): 530 – 539.

[7] HARRIS R I. The nature of the wind [C]//Proceedings of the Modern Design of Wind Sensitive Structures. London: Construction Industry Research and information Association, 1971:29 – 55.

[8] KAIMAL J C. Spectral characteristics of surface-layer turbulence [J]. Journal of Royal Meteorological Society, 1972, 98: 563 – 589.

[9] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87:194 – 211.

[10] HINZE J O. Turbulence [M]. New York: McGraw – Hill, 1975: 1 – 790.

[11] BATCHELOR G K. The theory of homogeneous turbulence [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1953: 34 – 44.

[12] MINER M A. Cumulative damage in fatigue [J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12: 159 – 164.

[13] CRANDALL S H, MARK W D. Random vibration in mechanical systems [M]. New York: Academic Press, 1963: 1 – 166.

[14] GEORGE R L, CONNELL J R. Rotationally sampled wind characteristics and correlations with MOD-OA wind turbine response [R]. Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1984.

[15] WIRSCHING P H, LIGHT M C. Fatigue under wide band random stresses [J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106: 1593 – 1607.

[16] RICE S O. Mathematical analysis of random noise [J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24: 46 – 156.

[17] GEMANISCHER Lloyd. Guideline for the certification of offshore wind turbines [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2005: 1 – 13.