



风力机翼型气动参数影响分析及叶片粗糙敏感性评价指标探讨

黄宸武^{①②}, 杨科^{①*}, 刘强^{①②}, 张磊^①, 白井艳^①, 徐建中^①

① 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* E-mail: yangke@iet.cn

收稿日期: 2011-04-12; 接受日期: 2011-08-03

国家自然科学基金资助项目(批准号: 50976117, 50836006)

摘要 水平轴风力机叶片表面特别是前缘粗糙度增大会导致叶片气动性能的下降和风力机输出功率的减少, 因此粗糙敏感性是叶片设计必须考虑的一个重要因素. 但是如何评价叶片粗糙敏感性, 目前尚无统一的标准. 本文从理论和实际出发, 分析了翼型气动参数对叶片气动性能的影响, 得出了翼型升力系数是风力机输出功率和轴向推力的主要影响参数, 并提出了变桨型水平轴风力机叶片各区段翼型的粗糙敏感性评价指标, 即是在定桨调速区, 无反馈运行情况下, 叶片外侧翼型应以升阻比和升力系数, 叶展中区和叶片内侧翼型应以升力系数作为粗糙敏感性评价指标; 有反馈运行的情况下, 叶片外侧翼型就应以最大升阻比和设计升力系数, 叶展中区和叶片内侧翼型以最大升力系数作为评价指标; 而在变桨定速区, 当变桨可以保证达到额定功率时就无需考虑粗糙度的影响.

关键词

水平轴风力机
翼型
气动性能
粗糙敏感性
评价指标

符号表

r	当地半径	α	攻角
R	风轮半径	ϕ	入流角
F_t	切向力	ρ	空气密度
F_n	轴向推力	c	翼型弦长
F_a	合力	C_L	升力系数
L	升力	C_D	阻力系数
D	阻力	Ω	风轮转动角速度
V_{x0}	垂直于风轮旋转平面的速度分量	a_r	当地轴向诱导因子
V_{y0}	平行于风轮旋转平面的速度分量	b_r	当地周向诱导因子
V_0	合成气流速度	λ_r	当地尖速比
V_1	来流速度	P	功率
θ	扭角	M	转矩
		Re	雷诺数

英文版发表信息: Huang C W, Yang K, Liu Q, et al. A study on performance influences of airfoil aerodynamic parameters and evaluation indicators for the roughness sensitivity on wind turbine blade. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 2993-2998, doi: 10.1007/s11431-011-4557-z

水平轴风力机目前正朝大型化方向发展, 径向伸展的叶片裸露在空气中易受到诸如沙尘, 雨雪, 昆虫的撞击与污染, 以及盐雾的侵蚀, 而使叶片表面特别是前缘粗糙度增大, 引起风力机叶片气动性能的下降, 导致风能利用效率的降低, 发电量的减少. 许多风场的实验^[1-4]都已证实了这种结果, 摘自文献[1]的图 1(a)显示了变桨型风力机叶片污染对输出功率的影响, 在小于额定风速时, 脏污叶片输出功率的损失随着风速的增大而增大, 在大于额定风速时, 通过功率反馈和变桨控制将输出功率保持在一个恒定值; 而摘自文献[2]的图 1(b)显示了 NEG Micon 公司的两台相距 50 m 的 700 kW 的失速型风力机叶片干净和粗糙时的输出功率情况, 在较低风速时, 输出功率几乎没有差别, 但在较高风速 9~25 m/s 时, 粗糙叶片比干净叶片的输出功率要低 0~30%. 文献[5]提到严重的昆虫污染可使功率损失高达 55%.

而与本文所述的污染粗糙物不同的某些人为有意设置在叶片非前缘部位的粗糙表面结构却对风力机有着增升或减阻, 改善气动性能的作用, 如涡流发生器, 肋条, 凹坑和凸包等, 其作用机理复杂, 不在

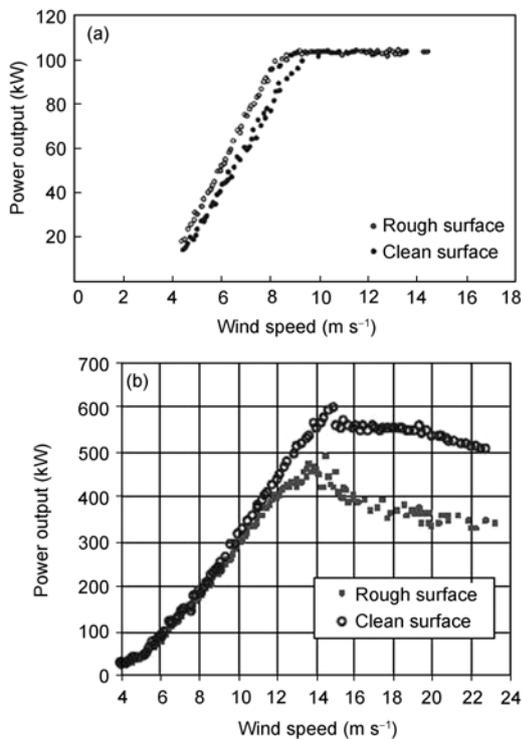


图 1 表面粗糙对风力机输出功率的影响
(a) 变桨型风力机^[1]; (b) 失速型风力机^[2]

本文讨论之列.

叶片是由不同厚度的翼型沿展向积叠组成的, 翼型的气动性能和叶片的旋转效应联合决定了风力机叶片的气动性能, 即是风力机风能利用效率的决定因素. 水平轴风力机叶片一般沿展向划分成三个区域: 叶片外侧($0.6 < r/R \leq 1$), 叶展中区($0.4 < r/R \leq 0.6$)和叶片内侧($r/R \leq 0.4$). 叶片外侧是风力机出功的主要部位, 仅叶片 $0.7R \sim 1R$ 展向高度就可捕捉到的 60% 以上的风能^[6], 此部位基本上采用 15%~21% 相对厚度的翼型; 叶展中区常用 25%~28% 相对厚度的翼型; 叶片内侧采用 30% 以上相对厚度的翼型.

叶片的粗糙敏感性是设计不容忽视的一个因素, 但是到目前为止, 对粗糙度影响的评价指标尚无统一的标准. 文献[7]用最大升力系数和最大升阻比的变化来综合衡量叶展中区和叶片内侧翼型的粗糙度影响程度; 文献[8]用最大升力系数减小率, 最小阻力系数增加率和俯仰力矩系数减小率来分析粗糙度对 S809 翼型气动性能的影响特性; 文献[9]用最大升力系数作为 12%~30% 相对厚度翼型粗糙敏感性的评价指标. 因此, 合理确定水平轴风力机叶片粗糙敏感性的评价指标是具有重要的意义.

1 理论基础

根据动量叶素理论^[10]将叶片沿展向分成许多微段 dr , 假设在每个叶素上的流动相互之间没有干扰, 叶素 dr 上的受力情况如图 2 所示.

dF_l 和 dF_n 可由下式计算:

$$dF_l = (L \sin \phi - D \cos \phi) dr, \tag{1}$$

$$dF_n = (L \cos \phi + D \sin \phi) dr. \tag{2}$$

根据升力系数和阻力系数的定义可得

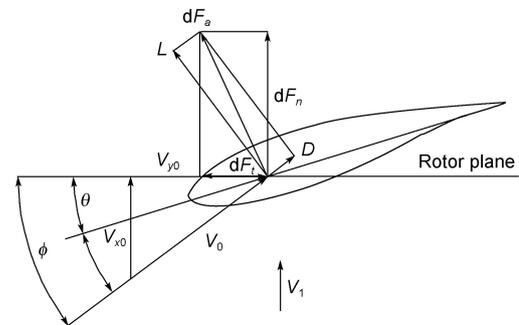


图 2 叶素上的作用力及其分解

$$L = \frac{1}{2} \rho V_0^2 c C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_0^2 c C_D$$

因此, (1)和(2)式改写为

$$\begin{aligned} dF_t &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr \\ &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 \sin \phi C_L \left[1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \phi \left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] dr, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} dF_n &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \\ &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 \cos \phi C_L \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \phi}{\left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] dr. \end{aligned} \quad (4)$$

考虑风轮后尾流的旋转, 由动量理论可知

$$V_{x0} = V_1(1 - a_r),$$

$$V_{y0} = \Omega r(1 + b_r),$$

$$V_0 = \sqrt{V_{x0}^2 + V_{y0}^2} = \sqrt{(1 - a_r)^2 V_1^2 + (1 + b_r)^2 (\Omega r)^2},$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{V_{x0}}{V_{y0}} = \frac{(1 - a_r) V_1}{(1 + b_r) \Omega r} = \frac{1 - a_r}{\lambda_r (1 + b_r)}.$$

因此, 联合(3)式得到

$$\begin{aligned} dP &= \Omega dM \\ &= \Omega r dF_t \\ &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 \Omega \sin \phi C_L \left[1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \phi \left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] r dr \\ &= \frac{1}{2} \rho c \lambda_r V_1^3 (1 - a_r) \sqrt{(1 - a_r)^2 + \lambda_r^2 (1 + b_r)^2} C_L \\ &\quad \times \left[1 - \frac{\lambda_r (1 + b_r)}{(1 - a_r) \left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] dr. \end{aligned} \quad (5)$$

(4)式改写为

$$\begin{aligned} dF_n &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 \cos \phi C_L \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \phi}{\left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] dr \\ &= \frac{1}{2} \rho c \lambda_r V_1^2 (1 + b_r) \sqrt{(1 - a_r)^2 + \lambda_r^2 (1 + b_r)^2} C_L \\ &\quad \times \left[1 + \frac{1 - a_r}{\lambda_r (1 + b_r) \left(\frac{C_L}{C_D} \right)} \right] dr. \end{aligned} \quad (6)$$

2 实际叶片

为了探索翼型气动参数对叶片气动性能的影响程度, 摘录某公司 1.5 MW/40.3 m 水平轴风力机叶片的设计数据^[11], 叶片各截面的气动参数见表 1, 叶片数为 3 片, 额定转速 17.4 r/min, 额定风速 10.2 m/s,

表 1 1.5 MW 变桨型水平轴风力机设计点叶片主要剖面的气动参数($\lambda=9.25$)^[11]

r	a_r	b_r	ϕ (°)	α (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	$B/A=\operatorname{ctg} \phi(C_D/C_L)$ (%)	$D/C=\operatorname{tg} \phi(C_D/C_L)$ (%)
10	0.313	0.040	16.5	6.2	1.074	0.0125	86.1	3.92	0.344
12	0.330	0.029	13.6	6.1	1.050	0.0115	91.1	4.54	0.266
14	0.329	0.021	11.9	6.0	1.017	0.0107	95.1	4.99	0.222
16	0.326	0.016	10.5	5.5	1.002	0.0099	101.6	5.31	0.182
18	0.327	0.013	9.4	5.1	0.997	0.0090	110.4	5.47	0.150
20	0.328	0.010	8.5	4.7	0.991	0.0082	120.2	5.57	0.124
22	0.326	0.009	7.7	4.6	0.975	0.0078	125.8	5.88	0.107
24	0.327	0.007	7.1	4.8	0.960	0.0075	127.5	6.30	0.098
26	0.326	0.006	6.6	5.0	0.939	0.0073	128.8	6.71	0.090
28	0.327	0.005	6.1	5.2	0.925	0.0071	130.3	7.18	0.082
30	0.329	0.005	5.7	5.1	0.912	0.0072	127.4	7.86	0.078
32	0.329	0.004	5.3	5.2	0.904	0.0072	125.6	8.58	0.074
34	0.323	0.003	5.1	5.1	0.884	0.0072	122.3	9.16	0.073
36	0.318	0.003	4.8	4.8	0.867	0.0075	115.2	10.34	0.073
38	0.327	0.003	4.5	4.5	0.846	0.0075	112.3	11.31	0.070

翼型展向分布为: 从叶根向叶尖依次布置圆柱, DU00-W2-401, DU00-W2-350, DU97-W-300, DU91-W2-250, NACA63-421, NACA63-418, NACA63-415 翼型.

3 分析讨论

反映风力机气动性能的主要参数是输出功率 P 和轴向推力 F_n , 把对其影响最大的参数作为粗糙度敏感性的评价指标是科学, 合理的. 由于叶片展向各翼型的设计原则不同, 比如在叶片外侧选薄翼型要具有高升阻比, 以获得最大的功率输出, 叶片内侧选厚翼型, 除要获得足够的结构刚度和强度外, 还要有高的最大升力系数, 以减少叶片面积. 因此, 对于叶片的不同部位, 各参数对气动性能的影响是不同的, 粗糙度敏感性评价指标也应该有所区分. 下面结合理论和实际进行详细地分析:

从动量叶素理论得到的(5)和(6)式可知, 对于确定的来流速度和翼型, 输出功率 P 和轴向推力 F_n 与叶素的升力系数 C_L , 阻力系数 C_D , 轴向诱导因子 a_r , 周向诱导因子 b_r 和尖速比 λ_r 有关. 对于输出功率 P 来说, 希望升力系数 C_L 高, 阻力系数 C_D 低比较好, 而对于轴向推力 F_n , 希望升力系数 C_L 低, 阻力系数 C_D 低比较好, 两者矛盾的地方是升力系数 C_L 的取舍.

首先, 从以下三个假设来分析一下升力系数 C_L 与阻力系数 C_D 对输出功率 P 和轴向推力 F_n 影响的大小. 假设其他参数不变.

1) 升力系数 C_L 下降 10%, 阻力系数 C_D 不变, 则升阻比 C_L/C_D 下降 10%;

2) 升力系数 C_L 下降 10%, 阻力系数 C_D 下降 10%, 则升阻比 C_L/C_D 保持不变;

3) 升力系数 C_L 不变, 阻力系数 C_D 升高 10%, 则升阻比 C_L/C_D 下降 9.1%.

令 $C_L/C_D=K$, 那么由(5)和(6)式可得

$$(a) \frac{dP_1 - dP'_1}{dP_1} = \frac{C_{L1} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_1}\right) - C'_{L1} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K'_1}\right)}{C_{L1} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_1}\right)} = \frac{0.1}{1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_1}} > 10\%$$

$$\frac{dF_{n1} - dF'_{n1}}{dF_{n1}} = \frac{C_{L1} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_1}\right) - C'_{L1} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K'_1}\right)}{C_{L1} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_1}\right)} = \frac{0.1}{1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_1}} < 10\%$$

从表 1 实际数据可知 $\text{tg}\phi K_1$ 在叶尖最小 0.070%, 叶根最大 0.344%, 因此,

$$(b) 9.97\% \leq \frac{dF_{n1} - dF'_{n1}}{dF_{n1}} \leq 9.99\%$$

$$\frac{dP_2 - dP'_2}{dP_2} = \frac{C_{L2} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_2}\right) - C'_{L2} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K'_2}\right)}{C_{L2} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_2}\right)} = 10\%$$

$$\frac{dF_{n2} - dF'_{n2}}{dF_{n2}} = \frac{C_{L2} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_2}\right) - C'_{L2} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K'_2}\right)}{C_{L2} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_2}\right)} = 10\%$$

综合(a)可以推断, 实例叶片升力系数减小 10%, 轴向推力减小 9.97%~9.99%, 阻力系数减小 10%, 使轴向推力进一步减小了 0.01%~0.03%.

$$(c) \frac{dP_3 - dP'_3}{dP_3} = \frac{C_{L3} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_3}\right) - C'_{L3} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K'_3}\right)}{C_{L3} \left(1 - \frac{1}{\text{tg}\phi K_3}\right)} = \frac{0.1}{\text{tg}\phi K_3 - 1}$$

从表 1 数据 B/A 换算可知, $\text{tg}\phi K_3$ 在叶尖最小 8.84, 叶根最大 25.50, 因此,

$$0.41\% \leq \frac{dP_3 - dP'_3}{dP_3} \leq 1.28\%$$

$$\frac{dF_{n3} - dF'_{n3}}{dF_{n3}} = \frac{C_{L3} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_3}\right) - C'_{L3} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K'_3}\right)}{C_{L3} \left(1 + \frac{\text{tg}\phi}{K_3}\right)} = \frac{-0.1}{1 + \frac{K_3}{\text{tg}\phi}} < 0$$

从表 1 数据 D/C 换算可知, $K_3/\text{tg}\phi$ 在叶尖最大 1428.57, 叶根最小 290.70, 因此,

$$-0.0343\% \leq \frac{dF_{n3} - dF'_{n3}}{dF_{n3}} \leq -0.0070\%$$

也就是说, 实例叶片阻力系数增大 10%, 升阻比减小 9.1%, 轴向推力增大的份额非常少, 只有 0.0070%~0.0343%.

一般而言, 设计的风力机都是希望功率系数最大, 所以轴向诱导因子都尽量设计在约 0.33, 正常运行状态下是不会出现轴向诱导因子大于 0.5 的情况, 因此上述借助动量叶素理论的分析是有效的.

综上所述, 对输出功率而言, 升力系数的减小对其影响最大, 可以认为升力系数是输出功率影响最重要的参数; 对轴向推力而言, 阻力系数增加与减小对轴向推力的影响很微小, 甚至可以忽略, 而且升力系数减小会使轴向推力减小, 这是有益的. 综合来看, 在考察粗糙度影响时, 只需考虑对输出功率的影响, 可以不考虑对轴向推力的影响. 其次, 为了进一步在量级上有一个认识, 再来看一下 1.5 MW 实际风力机的情况.

由(5)式简化得到

$$dP = A - B,$$

式中, A 是一个与 C_L 有关的数, B 是一个与 C_D 有关的数.

为了了解在叶片展向数值 B 占数值 A 的份额, 计算 $B/A = \text{ctg} \phi (C_D/C_L)$ 数值如表 1 和图 3(a) 所示.

同理, 由(6)式简化得到

$$dF_n = C + D,$$

式中, C 是一个与 C_L 有关的数, D 是一个与 C_D 有关的数.

为了了解在叶片展向数值 D 占数值 C 的份额, 计算 $D/C = \text{tg} \phi (C_D/C_L)$ 数值如表 1 和图 3(b) 所示.

从图 3(a) 可以看出, 阻力系数的增大对输出功率的减小的影响不大, 大部分区域都在 10% 以下, 且沿叶尖方向影响逐渐增大, 同时也说明了升力是输出功率的主要贡献参数, 阻力对输出功率的减小在叶片外侧相对较严重; 图 3(b) 也显示了阻力系数的增大对轴向推力的增大影响非常小, 都在 0.35% 以下, 且沿叶尖方向影响逐渐减小, 说明了轴向推力的产生主要来源于升力, 阻力对轴向推力的增加在叶片内侧相对更大. 风力机的主要任务是发电, 输出功率是最为关键的一个指标, 而叶片外侧是出功的主要部位, 因此, 尽管阻力系数影响比例不是太大, 但是此部位的功率基数相对较大, 所以在叶片外侧还是需要考虑阻力系数对输出功率的影响(对实例叶片, 在外侧 $r > 24$ m 区域, 其 B/A 约大于 6.30%), 而在叶片的大部分区域, 阻力系数的影响可以忽略. 基于此结论, 认为在叶片外侧以升阻比和升力系数, 在叶展

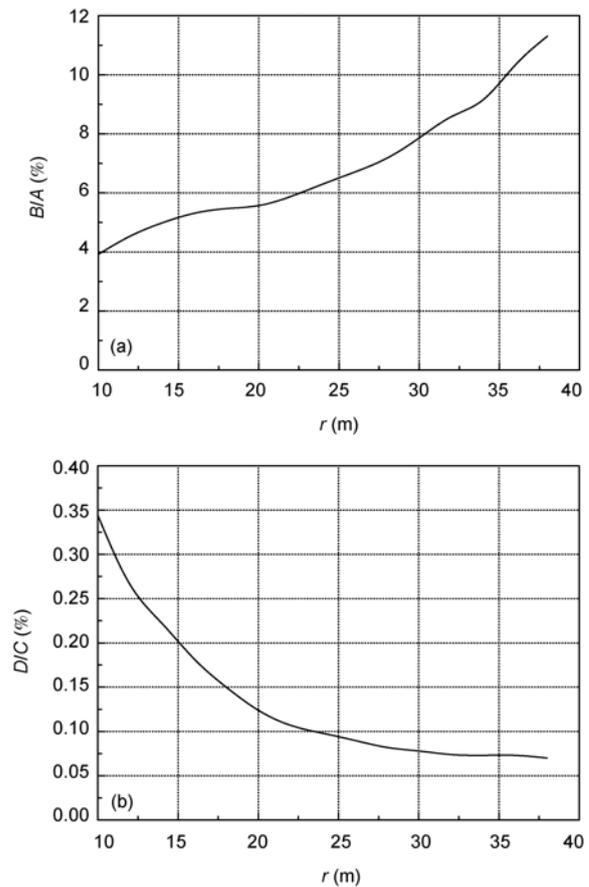


图 3 1.5 MW 风力机沿叶片展向阻力系数相对升力系数对气动性能的影响

(a) 阻力系数相对升力系数对输出功率的影响; (b) 阻力系数相对升力系数对轴向推力的影响

中区和叶片内侧以升力系数作为翼型粗糙敏感性评价指标是合理的. 这与叶片的设计原则“叶片外侧翼型应具有相对高的升阻比, 叶片内侧翼型应具有较高的最大升力系数”^[10]是一致的.

目前风电行业制造的风力机大多是变桨距调节型风力机, 其控制策略也与粗糙敏感性的评价方法有关. 例如: 在启动风速到额定风速的定桨变速区间, 是否采用反馈系统, 如无反馈系统, 那么翼型的工作点是由设计根据干净叶片的情形确定的, 原则是要保证工作在最佳尖速比, 同时叶片外侧翼型工作在最大升阻比的攻角, 内侧翼型工作在最大升力系数的攻角. 而当叶片遭受污染时, 其控制策略是不会改变的. 因此, 评价此种情况下的粗糙敏感性, 对于叶片外侧翼型, 其指标应该选对应干净叶片工作攻角下的升阻比和升力系数; 对于叶片内侧翼型, 应该选

干净叶片工作攻角下的升力系数才是合理的. 而在有反馈的情况下, 叶片外侧翼型选择最大升阻比和设计升力系数, 内侧翼型选最大升力系数作为评价指标更为合理. 在变桨定速区, 由于系统将输出功率控制在一个恒定值, 因此当变桨可以保证达到额定功率时就可以不考虑粗糙度的影响. 总之, 粗糙敏感性评价指标应根据风力机运行的实际情况决定.

4 结论

1) 联合理论与实际, 分析得出: 翼型的升力系数对风力机输出功率影响最大, 是输出功率影响最重要的参数, 阻力系数对输出功率影响不大, 在叶展中区和内侧可以忽略其影响. 然而, 阻力对输出功率的减少在叶片外侧相对较严重, 而且叶片外侧是风

力机出功的主要部位, 此部位的功率基数相对较大, 需要考虑阻力系数对输出功率的影响. 阻力系数对轴向推力的影响很微小, 甚至可以忽略. 阻力对轴向推力的增加在叶片内侧相对较大; 叶片表面特别前缘粗糙度增大会引起翼型升力系数的减小, 这对减小轴向推力是有益的.

2) 对于变桨型水平轴风力机, 粗糙敏感性的评价指标应视其控制策略而定. 在定桨调速区, 若无反馈系统, 那么叶片外侧翼型以升阻比和升力系数, 叶展中区和叶片内侧翼型以升力系数作为粗糙敏感性评价指标是合理的; 而在有反馈的情况下, 叶片外侧翼型就应该选择最大升阻比和设计升力系数, 叶展中区和叶片内侧选最大升力系数作为评价指标更为合理. 在变桨定速区, 当变桨可以保证达到额定功率时就可以不考虑粗糙度的影响.

参考文献

- 1 Molly J P. Wind Energy--Theory, Application, Measuring. 2nd ed. Karlsruhe: Verlag C F M, 1996
- 2 Corten G P, Veldkamp H F. Insects can halve wind-turbine power. *Nature*, 2001, 412: 42-43
- 3 Corten G P, Veldkamp H F. Insects cause double stall. In: *European Wind Energy Conference*, Copenhagen, Denmark, 2001
- 4 Khalfallaha M G, Koliub A M. Effect of dust on the performance of wind turbines. *Desalination*, 2007, 209: 209-220
- 5 Dalili N, Edrisy A, Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renewable and Sustainable Energy Rev*, 2009, 13: 428-438
- 6 杨科, 王会社, 徐建中, 等. 基于 CFD 技术的高性能风力机翼型最优化设计方法. *工程热物理学报*, 2007, 20(4): 586-588
- 7 van Rooij R P J O M, Timmer W A. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. *J Solar Energy Eng*, 2003, 125(4): 468-478
- 8 Ramsay R R, Hoffmann M J, Gregorek G M. Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil. Technical Report NREL/TP-442-7817. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1995
- 9 Dahl K S, Fuglsang P. Design of the wind turbine airfoil family RISØ-A-XX. RisØ-R-1024(EN). Roskilde: RisØ National Laboratory, 1998
- 10 贺德馨. 风工程与工业空气动力学. 北京: 国防工业出版社, 2006
- 11 陈坤, 贺德馨, 戴有羽, 等. 1.5 MW/40.3 m 叶片气动外形优化设计. 第七届全国风能应用技术年会暨青海省等高原地区风能开发利用研讨会, 青海西宁, 2010