

文章编号:1000-582X(2011)07-014-06

泛函分析思想在新型风力机叶片设计中的应用

陈 进¹,张石强^{1,2},陆群峰¹,程江涛¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044; 2. 中材科技风电叶片股份有限公司,北京 102101)

摘 要:考虑法向力和切向力的叶尖损失,推导并给出了一种改进的风力机轴向和周向因子的计算模型。结合最新设计的高性能风力机专用翼型系列,利用泛函分析方法,研究了风力机叶片展向弦长及扭角分布的泛函表达方法,提出一种新的通用叶片形状的广义泛函方程;考虑实际风场风速的概率分布,空气密度及工业界对风力机叶片的气动与结构设计要求,分别以定速运行方式和变速运行方式下风力机叶轮年发电量输出最大化为目标,以叶片展向分布函数系数为设计变量,建立了 2.3 MW 风力机叶片优化设计数学模型;优化得到 2 组性能优越的风力机叶片。新叶片的捕风效率和年发电量都远远高于传统风力机叶片,其中,所设计定速叶片最大功率系数达到 0.515 7,变速叶片最大功率系数达到 0.517 7。

关键词:叶片;翼型;功率系数;优化设计;泛函分析

中图分类号:TH11;TK83

文献标志码:A

The application of functional theory to the design of new wind turbine blades

CHEN Jin¹, ZHANG Shi-qiang^{1,2}, LU Qun-feng¹, CHENG Jiang-tao¹

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

2. Sinomatech Wind Power Blade Co., Ltd., Beijing 102101, P. R. China)

Abstract: Considering the tip loss of normal and tangential forces, a new aerodynamic model of wind turbines is given. Based on the new series of dedicated high-performance wind turbine airfoil, the functional expressions of wind turbine blade chord and twist angle span-wise distribution are studied, and then a new common functional equation of the blade shape is presented. Considering the wind farmer wind speed distribution, air density and industrial requirements of the wind turbine blade, aiming at the maximizing annual energy generation in constant and variable speed operation condition respectively, assigning the coefficients of blade distribution functions as the variables, a 2.3 MW wind turbine blade shape optimization model is established. Two kinds of superior blade are also optimized. The efficiency and the annual electricity production of the new blades are much higher than traditional blades. Among the new blades, the maximum power coefficients of fixed speed blade and variable speed blade are 0.515 7 and 0.517 7 respectively.

Key words: blades; airfoils; power coefficient; design optimization; functional analysis

收稿日期:2011-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775227);重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC,2008BC3029)

作者简介:陈进(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为机械系统协同优化和可再生能源装备设计理论及方法,(E-mail)chenjin413@yahoo.com.cn。

风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视。风力机依靠风轮叶片捕捉风能,叶片设计理论是决定风力机功率特性和载荷特性的根本因素。对于风力机叶片的优化设计研究,国内外也有很多学者从不同方面进行了研究^[1-6]。重庆大学 Wang 等^[7]以风力机单位发电量的成本为目标,对几种不同装机容量的风轮进行了优化设计,降低了风力机单位发电量的成本;突尼斯学者 Badreddinne 等^[8]以风力机输出功率为目标函数,基于变分原理研究了风力机叶片的升力变化过程,并通过和 Glauert 模型的对比研究,对叶片进行了优化设计;汕头大学刘雄等^[9]考虑了风场风速的概率分布,以风力机年能量输出最大为设计目标,使用遗传算法进行搜索寻优,优化设计了 1.3 MW 风力机叶片;华北电力大学韩中合等^[10]提出了多次迭代优化设定诱导因子初始值的方法,以功率输出和年发电量最大为优化目标,对 1.5 MW 风力机叶片进行了优化设计。

但上述研究都是针对已有叶片进行局部形状改变和修型来提高风力机的效率,且优化过程中始终保持原有叶片的翼型形状及翼型分布不变,由于叶片的优化设计受到初始叶片及翼型的固有气动特性与性能的限制,不能更大幅度地改进叶片的性能和提高风力机的风能利用系数。笔者从风力机叶片设计的源头出发,叶片主要功率产生区域全部采用新设计的 WT 系列高性能风力机专用翼型,以风力机空气动力学理论为基础,采用泛函分析思想,应用级数来表征风力机叶片的弦长与扭角分布情况,分别以风轮定速运行工况和变速运行工况进行优化设计,得到了 2 组性能优越的风力机叶片。

1 风力机空气动力学模型的建立

采用一维的动量叶素 (Blade element momentum, BEM) 理论建立风力机空气动力学模型。由于一维理论中假定的圆盘是由无限个叶片组成,而实际中叶片的数量总是有限的,因此在建立空气动力学模型过程中就需要考虑叶尖损失的影响。

根据动量理论,考虑叶尖损失,风轮的推力和转矩可表示为^[11-12]

$$dq = 4\pi\rho v_0^2 aF(1-aF)rdr, \quad (1)$$

$$dM = 4\pi\rho v_0 bF(1-aF)r^3 dr, \quad (2)$$

式中: $F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp\left(-\frac{B(R-r)}{2r\sin\varphi}\right) \right]$; ρ 为空气密度; v_0 为来流风速; a 为轴向诱导因子; F 为普朗特叶尖损失修正因子; r 为叶片径向位置; ω 为风轮转

动角速度; b 为周向诱导因子; φ 为入流角; B 为叶片个数; R 为风轮半径。

根据叶素理论,考虑法向力和切向力的叶尖损失,风轮推力和转矩又可用表示为^[13]

$$dq = \frac{1}{2} B\rho c v_{rel}^2 F_1 C_n dr, \quad (3)$$

$$dM = \frac{1}{2} B\rho c v_{rel}^2 F_1 C_t r dr, \quad (4)$$

式中: $F_1 = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp\left(-g \frac{B(R-r)}{2r\sin\varphi}\right) \right]$; $g = \exp[-0.125(B\lambda-21)] + 0.1$; v_{rel} 为入流风速; c 为叶片弦长; λ 为叶尖速比; C_n 为法向力系数; C_t 为切向力系数。

通过式(1)-(4)可以求出轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 为

$$a = \frac{2 + Y_1 - \sqrt{4Y_1(1-F) + Y_1^2}}{2(1 + FY_1)}, \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{(1-aF)Y_2/(1-a) - 1}, \quad (6)$$

式中: $Y_1 = 4F\sin^2\varphi/(\sigma C_n F_1)$; $Y_2 = 4F\sin\varphi\cos\varphi/(\sigma C_t F_1)$; $\sigma = Bc/(2\pi r)$ 。

当轴向因子 a 大于 0.3 时,叶素理论将不再准确可靠,这时就需要对风力机的推力进行修正。此时的轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 变成

$$a = \left[2 + (1 - 2a_c F)Y_1 - \sqrt{(1 - 2a_c F)^2 Y_1^2 + 4Y_1(1 - 2a_c F + a_c^2 F)} \right] / 2, \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{(1-aF)Y_2/(1-a) - 1}, \quad (8)$$

式中 $a_c = 1/3$ 。

2 2.3 MW 风力机叶片设计数学模型

因为风轮空气动力学特性及其结构动力学特性与风场的气象情况,风资源分布情况,极端风速情况,环境因素等密切相关,所以风力机叶片的设计工况按照某风场实地情况设定:空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; 风场威布尔形状参数 $k = 2$; 风场威布尔尺度参数 $a = 7.899 \text{ m/s}$; 变速风力机切入风速 $v_{cutin} = 3.5 \text{ m/s}$; 定速风力机切入风速 $v_{cutin} = 5.5 \text{ m/s}$; 切出风速 $v_{cutout} = 25 \text{ m/s}$ 。

风力机叶片总体参数:额定功率 2.3 MW; 额定风速 12.5 m/s; 风轮叶片 3 片; 风轮转向顺时针; 风轮半径(即叶片长度) $R = 35 \text{ m}$; 此外考虑到一般工业要求叶尖速度应限制在 90 m/s 以内,所以设计叶尖速比为 $\lambda \leq 7$ 。

2.1 风力机叶片翼型选择及其分布

对风力机翼型而言,其升力与阻力比是最重要的性能指标,对提高风轮效率和对整个风力机组工作性能的影响关系极大。传统风力机一直沿用航空翼型,随着风力机技术的迅速发展,航空翼型并不能很好地满足风力机及其特殊运行环境的要求,国际上丹麦、荷兰、瑞典、德国和美国等风能技术发达国家都各自发展自己的风力机专用翼型^[14-15]。在国内,对风力机专用翼型的研究工作还很有限^[16],同时风力机专用翼型的参数数据受到世界各国专利的保护和限制,直接影响了中国风力机的气动设计水平。

本研究在叶片主要功率产生区域全部采用新设计的 WT 系列高性能风力机专用翼型,该系列翼型具有高升力系数,高升阻比,低前缘粗糙度敏感特性等优点。其中各个翼型按照对应于 2~3 MW 叶片展向位置处的气动条件进行设计:翼型 WT150 相对厚度为 0.15,分布于叶片展向的 85%~100%,设计工况为雷诺数 $Re=3.0 \times 10^6$,马赫数 $Ma=0.25$,设计攻角 $\alpha_d=5^\circ$;翼型 WT180 相对厚度为 0.18,分布于叶片展向的 65%~80%,设计工况雷诺数 $Re=3.0 \times 10^6$,马赫数 $Ma=0.20$,设计攻角 $\alpha_d=5^\circ$;WT201 相对厚度为 0.20,分布于叶片展向的 50%~60%,设计工况雷诺数 $Re=3.0 \times 10^6$,马赫数 $Ma=0.18$,设计攻角 $\alpha_d=5.5^\circ$;WT247 相对厚度为 0.25,分布于叶片展向的 35%~40%,设计工况雷诺数 $Re=3.0 \times 10^6$,马赫数 $Ma=0.16$,设计攻角 $\alpha_d=6^\circ$ 。25%~30%展向位置采用荷兰 Delft 大学所研制的相对厚度为 0.3 的 DU97-W-300 翼型;根部 10%~15%展向位置采用相对厚度为 0.4 的 DU00-W2-401 翼型,叶片根部靠近轮毂处采用直径为 2.3 m 的圆柱翼型。其中相邻翼型间的过渡翼型,通过相邻翼型的坐标插值得到。

如图 1 所示为所采用的新型 WT 系列风力机专用翼型型线轮廓。

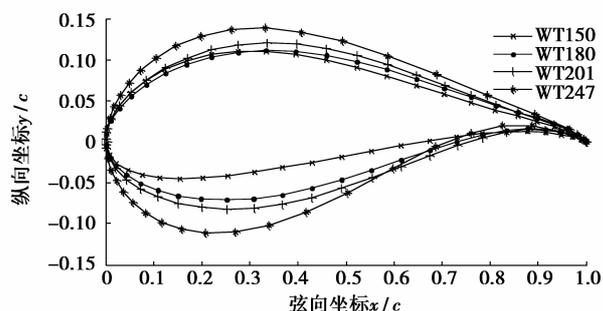


图 1 翼型型线轮廓

如图 2 所示为所选择新翼型在雷诺数为 $Re=3.0 \times 10^6$,光滑翼面条件下的气动特性对比图。该 WT 系列翼型相比传统风力机常用翼型具有很高的升力系数,且在风力机叶片翼型主要工作范围内具有很高的升阻比;能够很好地满足风力机运行要求。

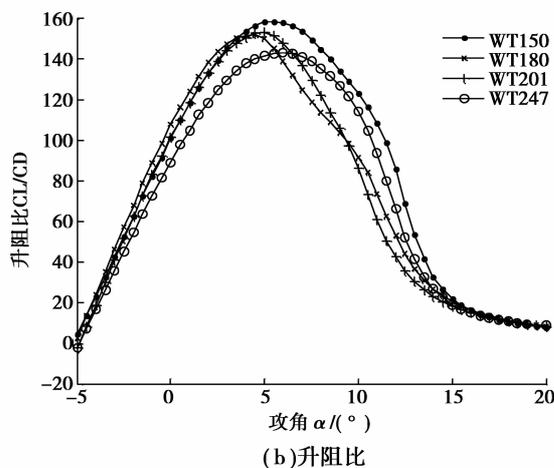
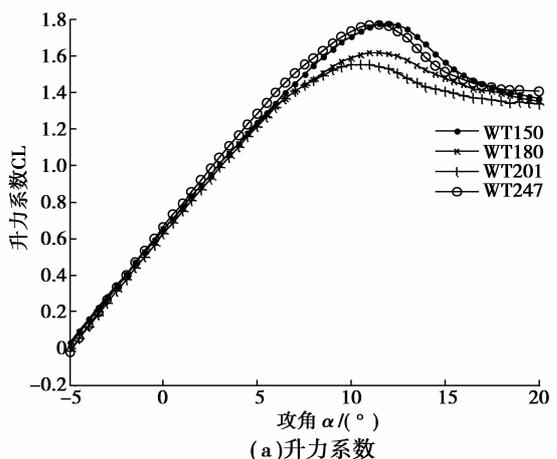


图 2 翼型气动特性情况

2.2 设计变量

叶片的外部形状决定了风轮捕获风能的效率,而叶片的半径、弦长、扭角以及相对厚度就直接构成了叶片的形状。这里将叶片半径看作常数,选取叶片的弦长和扭角的展向分布作为优化设计变量。根据 Taylor 级数对等思想,任意几何曲线的数学表达式都可以将其展开为级数。反之可通过级数来表征任意函数曲线,其几何形状及解析特性可通过级数系数的调整和优化加以控制。提出一种风力机叶片展向形状分布通用泛函表征形式为

$$\text{弦长分布函数} \quad c = \sum_{i=0}^n a_i (1-\mu)^i, \quad (9)$$

$$\text{扭角分布函数} \quad \beta = \sum_{i=0}^n b_i (1-\mu)^i, \quad (10)$$

式中: n 为级数的最高阶数; a_i 、 b_i 为分布函数的系

数; $\mu=r/R$ 为叶片展向位置。

可以用以上叶片形状分布函数来表达任意类似三维叶片形状的叶轮式流体机械(如风力机叶片、直升机螺旋桨、鼓风机叶片、风扇叶片等)的展向分布情况,研究发现,采用 4 阶幂级数能够很好地集成风力机叶片的弦长与扭角分布情况。

弦长分布函数:

$$c = a_4(1 - \mu)^4 + a_3(1 - \mu)^3 + a_2(1 - \mu)^2 + a_1(1 - \mu) + a_0, \quad (11)$$

扭角分布函数:

$$\beta = b_4(1 - \mu)^4 + b_3(1 - \mu)^3 + b_2(1 - \mu)^2 + b_1(1 - \mu) + b_0. \quad (12)$$

以分布函数系数作为叶片设计变量(10 个设计变量):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{10}) = (a_0, a_1, \dots, a_4, b_0, b_1, \dots, b_4). \quad (13)$$

2.3 目标函数

对于定速运行方式的风力机叶片,风轮转速保持恒定,由风轮功率特性可知,它只在某一个叶尖速比下,具有最大功率系数。为了使其在低风速运行获得较多风能,必须保持风轮在低于额定风速下运行时具有较大的功率系数;当风速大于额定风速时,通过桨距角的调整使风力机输出功率控制在额定功率 2.3 MW。以风力机年发电量最大化作为目标函数

$$F_1(X) = \max(AEP), \quad (14)$$

式中 AEP 为风力机的年平均输出功率,风力机的输出功率和风速有直接的关系。假设风力机每年的工作时间为 8 700 h,那么每年的总输出能量就可以表示为

$$AEP = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} (P(V_{i+1}) + P(V_i)) \times f(V_i < V < V_{i+1}) \times 8\,700, \quad (15)$$

式中: $f(V_i < V < V_{i+1}) = \exp\left(-\left(\frac{V_i}{A}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{i+1}}{A}\right)^k\right)$, A 为平均风速; k 为 Weibull 风场风速分布形状参数。

对于变速恒频型风力发电机组形式,其风轮叶片桨距角可以调节,同时发电机可以变速,并输出恒频恒压电能。与恒速型风力发电机组相比,可以在低于额定风速时,通过改变转速和叶片桨距角使风力机制最佳叶尖速比下运行,输出最大功率。而在高于额定风速时,可以通过改变叶片桨距角使风力机功率输出稳定在额定功率,变速运行工况的年发电量与设计叶尖速比下的功率系数成正比。以叶片功率系数最大化作为设计目标:

$$F_2(X) = \max(C_p). \quad (16)$$

2.4 约束条件

叶片设计约束条件,按照工业界 2~3 MW 风力机叶片设计常用要求设定:

1) 为满足叶片运行中叶根强度条件及与轮毂连接的要求,叶片根部弦长取 2.3 m,

$$g_1(X) = c_{\text{root}} - 2.3 = 0. \quad (17)$$

考虑叶片的加工制造难易程度和成本要求,需对叶片最大弦长,最大扭角及相应的展向位置进行约束。

2) 叶片最大弦长小于 3 m,

$$g_2(X) = c_{\text{max}} - 3 \leq 0. \quad (18)$$

3) 最大弦长出现位置为叶片展向的 20%,

$$g_3(X) = c(\mu) - c(0.2) \leq 0. \quad (19)$$

4) 叶片最大扭角小于 14°

$$g_4(X) = \beta_{\text{max}} - 14 \leq 0. \quad (20)$$

5) 叶片最大扭角出现位置为叶片展向的 20%,

$$g_5(X) = \beta(\mu) - \beta(0.2) \leq 0. \quad (21)$$

6) 叶尖翼型厚度不小于 0.15,

$$g_6(X) = 0.15 - t(1) \leq 0. \quad (22)$$

7) 叶根 20%展向处翼型厚度不小于 0.3,

$$g_7(X) = 0.3 - t(0.2) \leq 0. \quad (23)$$

3 设计结果

风力机的功率及载荷特性采用 1 维-BEM 理论并结合改进后的叶尖损失修正模型建立空气动力学模型编制程序进行计算。从建立的优化数学模型可以看出,本优化是一个非线性单目标多约束问题,应用编制的改进遗传算法程序,进行优化求解,其中翼型的气动特性采用风力机翼型专用分析软件 RFOIL-3D 计算。分别按照变速运行工况和定速运行工况优化后所得叶片弦长与扭角分布函数系数如表 3 所示。分别将相应的分布函数系数带入叶片分布函数方程,即可得到叶片展向分布形状。

表 1 叶片形状分布函数系数

弦长	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
变速叶片	1.216 4	0.006 3	1.141 7	1.561 0	0.644 78
定速叶片	1.186 6	0.311 1	0.486 1	1.953 7	0.771 7
扭角	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
变速叶片	-0.006 3	0.132 9	0.083 1	0.111 6	0.024 2
定速叶片	0.024 1	0.087 7	0.162 8	-0.000 6	0.034 5

将表 1 中第 1 组数据带入相应分布方程即可得到 4 阶非线性变速工况叶片的展向弦长分布和扭角分布情况;同样,将第 2 组参数带入叶片分布方程即可得到 4 阶非线性定速工况叶片的展向弦长分布和扭角分布情况。图 3 即为优化设计所得新型风力机叶片与传统 2 MW 风力机叶片弦长与扭角分布对比图;图 3(a)中,所设计变速叶片与定速叶片弦长分布非常接近,最大弦长小于 3 m,且在 20%~90%展向范围内都小于传统叶片,有利于减轻叶片质量和降低风力机运行中的载荷;图 3(b)中,新设计叶片的最大扭角约为 12°,定速叶片扭角在 30%~100%展向范围大于变速叶片,且随着展向位置的升高,扭角的差距增大,在展向 60%~100%范围内,变速叶片与传统 2 MW 叶片的扭角分布较为接近。

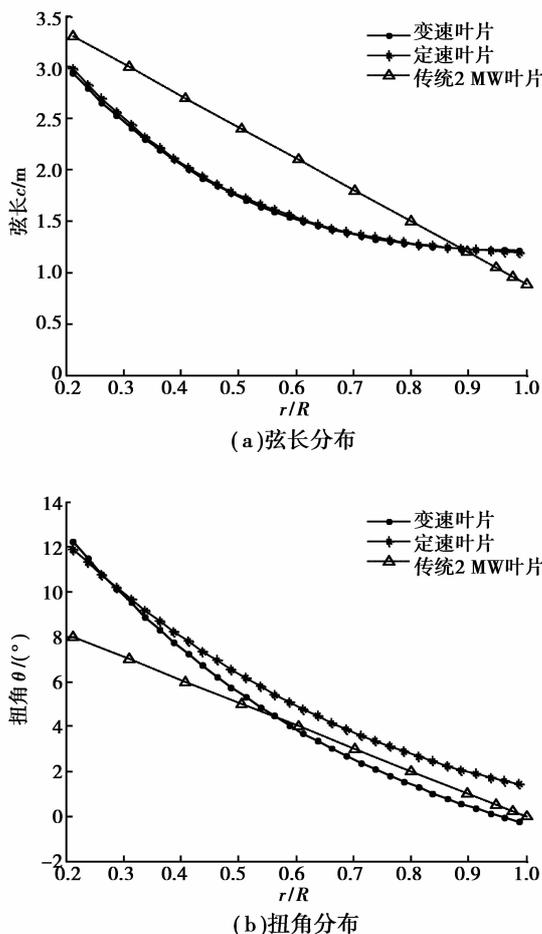


图 3 风力机叶片展向分布情况

图 4 为定速运行工况下,风轮从 5 m/s 切入风速到 25 m/s 切出风速下的功率分布图和年发电量的分布图。该运行工况下,在整个风力机运行风速范围内,新设计叶片都比传统叶片能够捕捉更多的风能;

新设计叶片的最大功率系数远远高于传统叶片的 0.465 8,分别为 0.515 7(定速叶片)和 0.517 7(变速叶片);定速叶片较传统 2 MW 风力机叶片的年均发电量提高 40.2%。从图中可得出,在 5~9 m/s 的低风速范围内,按定速运行设计的叶片比变速叶片能够捕捉更多的风能,比变速叶片高 4.1% 的年平均发电量。详细功率参数对比情况如表 2 所示。

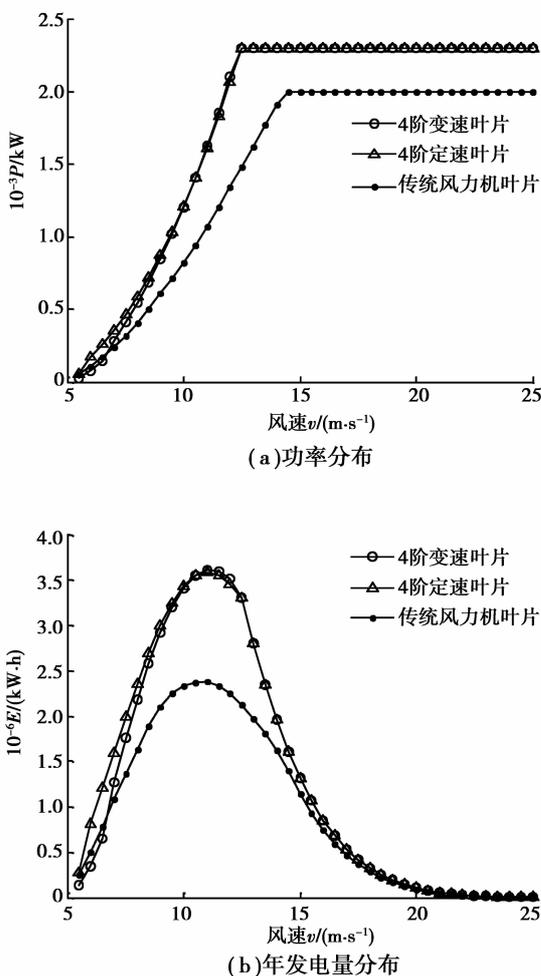


图 4 定速运行工况功率特性对比

表 2 定速运行工况下功率特性参数对比

发电特性	功率特性参数		
	4 阶定速叶片	4 阶变速叶片	传统 2 MW 叶片
AEP(年发电量) / (kW · h)	5.293 1 × 10 ⁶	5.086 2 × 10 ⁶	3.776 4 × 10 ⁶
最大功率系数 C _p	0.515 7	0.517 7	0.465 8

图 5 为变速运行工况下,风轮从 3.5 m/s 切入风速到 25 m/s 切出风速下的功率分布图和年发电量的分布图。该运行工况下,在整个风力机运行风速范围内,新设计叶片都比传统叶片能够捕捉更多的风能;新设计叶片的功率系数远远高于传统叶片的 0.365 2,分别为 0.500 3(定速叶片)和 0.517 7(变速叶片);变速叶片较传统 2 MW 风力机叶片的年均发电量提高 65.7%。从图中可得出,在额定风速 12.5 m/s 以下的范围内,按变速叶片较定速叶片能够捕捉更多的风能,比定速叶片高 2.4% 的年平均发电量。详细功率参数对比情况如表 3 所示。

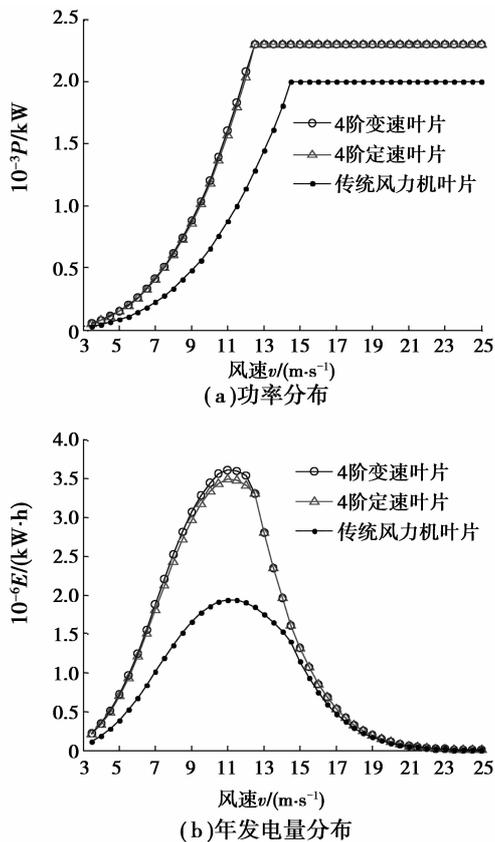


图 5 变速运行工况功率特性对比

表 3 变速运行工况下功率特性参数对比

发电特性	功率特性参数		
	传统 2 MW 叶片	4 阶 定速叶片	4 阶 变速叶片
AEP(年发电量) /(kW·h)	5.588 7× 10 ⁶	5.720 3× 10 ⁶	3.451 4× 10 ⁶
功率系数 C _p	0.500 3	0.517 7	0.365 2

4 结 论

1)对于风力机叶片形状的表达,采用泛函分析思想,提出一种风力机叶片展向形状分布通用泛函表征形式,将几何形状优化提升到函数优化的高度,同时为叶轮式流体机械的设计与参数化表达提供了参考。

2)以风力机空气动力学为基础,在所设计叶片主要功率产生区域全部采用新设计的 WT 系列高性能风力机专用翼型,分别以定速运行方式和变速运行方式叶轮的发电量输出最大化作为优化设计目标,以叶片展向分布形状函数系数作为优化设计变量,提出了风力机叶片形状优化数学模型。

3)应用该叶片优化模型,分别按风力机变速运行和定速运行工况设计得到额定功率为 2.3 MW 的性能优良的变速叶片和定速叶片;在相同运行工况下,新型定速叶片较传统 2 MW 风力机叶片的年平均发电量提高 40.2%,变速叶片较传统 2 MW 风力机叶片的年平均发电量提高 65.7%。为高效率风力机叶片的设计和开发提供了可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] JURECZKO M, PAWLAK M, MEZYK A. Optimization of wind turbine blades [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167 (2/3): 463-471.
- [2] VAROLA A, ILKILIC C, VAROL Y. Increasing the efficiency of wind turbines [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(9): 809-815.
- [3] JOHANSEN L S, LUND E, KLEIST J. Failure optimization of geometrically linear/nonlinear laminated composite structures using a two-step hierarchical model adaptivity [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198 (30/32): 2421-2438.
- [4] MARIN J C, BARROSO A, PARIS F, et al. Study of fatigue damage in wind turbine blades [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(2): 656-668.
- [5] JACKSON K J, ZUTECK M D, VAN DAM C P, et al. Innovative design approaches for large wind turbine blades [J]. Wind Energy, 2005, 8(2): 141-171.
- [6] 何玉林, 刘桦, 杜静. 风力机旋转叶片脉动风场建模与数值仿真 [J]. 重庆大学学报, 2009, 32 (10): 1126-1131.

- [14] 刘启跃,张伟,郭俊,等. 线接触条件下微动摩擦特性的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 729-732.
LIU QI-YUE, ZHANG WEI, GUO JUN, et al. Investigation of fretting friction characteristics under line contact[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 729-732.
- [15] SWIESKOWSKI H P. Design and application of stranded wire springs[J]. Springs, 2000, 39(2): 65-66, 68-69.
- [16] 闵建军,王时龙. 多股螺旋弹簧动态计算分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 199-203.
MIN JIAN-JUN, WANG SHI-LONG. Analysis on dynamic calculation of strand wire helical spring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 199-203.

(编辑 张 苹)

~~~~~

(上接第 19 页)

- HE YU-LIN, LIU HUA, DU JING. Simulation study of stochastic fluctuating wind field for wind turbine blades[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(10): 1126-1131.
- [7] WANG X D, SHEN W Z, ZHU W J, et al. Shape optimization of wind turbine blades[J]. Wind Energy, 2009, 12(8): 781-803.
- [8] BADREDDINNE K, ALI H, DAVID A. Optimum project for horizontal axis wind turbines 'OPHWT'[J]. Renewable Energy, 2005, 30(13): 2019-2043.
- [9] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 水平轴风力机风轮叶片优化设计模型研究[J]. 汕头大学学报: 自然科学版, 2006, 21(1): 44-49.  
LIU XIONG, CHEN YAN, YE ZHI-QUAN. Research on the HAWT rotor blades optimization [J]. Journal of Shantou University: Natural Science Edition, 2006, 21(1): 44-49.
- [10] 韩中合, 吴铁军. 基于遗传算法的风力机叶片优化设计[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 955-958.  
HAN ZHONG-HE, WU TIE-JUN. Optimal design of wind turbine blades based on genetic algorithm [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 955-958.
- [11] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [12] GLAUERT H. Airplane propellers [M]. New York: Dover, 1963.
- [13] SHEN W Z, MIKKELSEN R, SORENSEN J N, et al. Tip loss correction for wind turbines computations[J]. Wind Energy, 2005, 8(4): 457-475.
- [14] FUGLSONG P, BAK C. Development of the Riso wind turbine airfoils[J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 145-162.
- [15] TIMMER W, VAN T P. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 488-496.
- [16] 王旭东, 陈进, 张石强, 等. 风力机叶片翼型线集设计理论研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 211-228.  
WANG XU-DONG, CHEN JIN, ZHANG SHI-QIANG, et al. Integration study on airfoil profiles for wind turbines [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 211-228.

(编辑 张 苹)