

Aerodynamic Optimization Design and Calculation of a Large-Scale Horizontal Axis Wind Turbine with Pitch Regulation Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

Congxin Yang¹, Xiaojing Lv², Gang Tong

¹ Lanzhou University of Technology, Gansu Provincial Technology Center for Wind Turbines, Lanzhou 730050, China

² Lanzhou University of Technology, Gansu Provincial Technology Center for Wind Turbines, Lanzhou 730050, China

E-mail: ycxwind@163.com, xjjh2006@163.com

Abstract: The complicated wake vortex aerodynamic model, which is based on limited blade numbers and variable circulation along blade axis, and the PSO algorithm were used in aerodynamic optimization design and calculation of a large-scale horizontal axis wind turbine (HAWT) with pitch regulation, and corresponding mathematical models also were established. A 1.5MW HAWT with pitch regulation, as an example, was designed and calculated As well. The results show that the method put forward in this paper is feasible and helpful to in aerodynamic optimization design and calculation of a HAWT with pitch regulation.

Keywords: wind turbine; PSO algorithm; variable pitch; optimization design

基于粒子群算法的大型风力机变桨距气动优化设计和计算

杨从新¹, 吕小静², 童刚

¹兰州理工大学, 甘肃省风力机工程技术研究中心, 兰州, 中国, 730050

²兰州理工大学, 甘肃省风力机工程技术研究中心, 兰州, 中国, 730050

¹Email: ycxwind@163.com, xjjh2006@163.com

摘要: 本文采用基于有限叶片变环量的旋涡气动模型, 结合粒子群算法 (PSO) 对大型变桨距风力机风轮进行气动优化设计和计算, 并建立了设计计算的数学模型。同时, 以 1.5MW 的大型风力机为算例进行变桨距气动优化设计和计算。设计计算结果表明, 本文的方法及其数学模型具有其可行性和一定的实用性。

关键词: 风力机; 粒子群算法; 变桨距; 优化设计

0 引言

一般风力机风轮的气动外形是根据给定的额定风速与转速进行设计的, 以保证其以最优的气动性能产生额定出力[1~2]。然而风电场的风速很少能保持为其额定值, 为使风力机风轮在非额定风速下运行时还能具有尽可能高的气动性能, 并且限制其过载运行, 就必须使叶片安放角根据风速信号按确定方式调整, 即进行桨距调节。

目前, 大型风力发电机组多采用统一变桨距控制技

资助信息: 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(课题编号: 2007CB714605), 甘肃省科技重大专项计划(项目编号: 0801GKDA060)

术[3], 其控制原理如图 1 所示。给定风速信号和功率信号, 控制系统将按预先设计好的风速与桨距角的对应关系进行控制调节。为了能够较准确的进行变桨距调节的计算, 本文将采用基于有限叶片变环量的气动模型, 结合粒子群算法对大型风力机桨距调节进行气动优化设计和计算。

1 气动计算模型

风力机气动理论从 Betz 和 Glauert 建立的经典理论, 到目前常用的动量—叶素理论及其修正, 这些理论虽易于估算机组初始设计时整机的气动性能, 但都

进行了一些假设和简化，对叶片气动性能计算还不够准确。为了能够得到更准确的气动计算结果，本文采用一种基于有限叶片变环量的气动模型[4]。

该模型认为水平轴风力机风轮的尾流是由复杂旋涡系统组成，其分别为：位于风轮轴线上的中心涡、沿叶片轴线的变环量附着涡以及从叶片尾缘与叶尖脱落的螺旋状自由涡层，如图 2 所示。

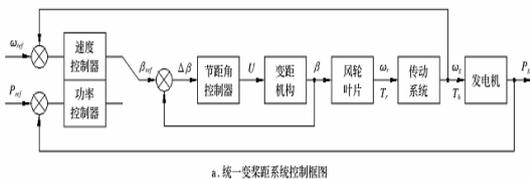


Figure 1. Chart of the pitch adjusting control
图 1. 桨距调节控制图

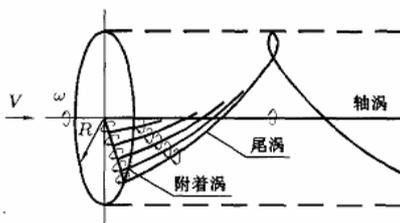


Figure 2. Aerodynamic vortex model of wind rotor
图 2. 风轮旋涡气动模型

该气动模型在不作无限叶片数与定环量假设的情况下计算叶片某断面处的旋涡诱导速度和来流下洗角，给出来流的真实速度大小和方向，用于进行风轮的气动计算。气动计算模型如图 3 所示。

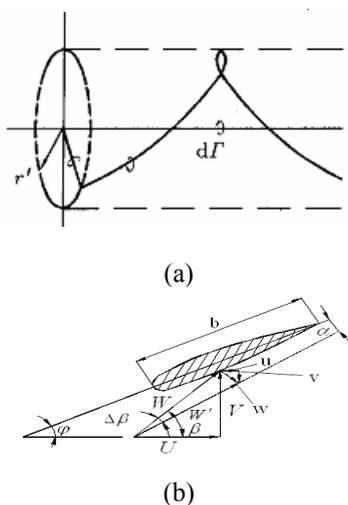


Figure 3. Calculation models

图 3. 计算模型 ((a) 微元涡束; (b) 叶片某断面处的速度图)

根据比奥萨法尔定理和库塔-茹可夫斯基升力公式及翼剖面理论可知，上述模型求解叶片 r 处环量分布 $\Gamma(r)$ 的方程[8]如下：

$$\Gamma(r) = \frac{1}{2} W b C_L - \frac{1}{2} b C_L \frac{1}{\cos \beta} \int_{r_0}^{\infty} \frac{d\Gamma'}{\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{r'(r' - r \cos \theta_n) d\theta}{[r^2 - 2r'r \cos \theta_n + r'^2 + (V\theta)^2]^{3/2}}} dr' \quad (1)$$

当风轮的来流条件和几何参数给定后，解此积分微分方程，可得到沿叶片分布的环量和诱导速度及下洗角。进而求得推力系数 C_t 和功率系数 C_p ，其无因次量形式的表达式为：

$$C_p = \frac{2P}{\rho \pi V^3 R^2} = 8z \lambda_0^3 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma}(\bar{r}) \left[\frac{1}{\lambda_0} - \bar{r}(\mu + \Delta\beta) \right] \bar{r} d\bar{r}$$

$$C_t = \frac{2F}{\rho \pi V^2 R^2} = 8z \lambda_0^2 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma}(\bar{r}) \left[\bar{r} + \frac{1}{\lambda_0} (\mu + \Delta\beta) \right] d\bar{r} \quad (2)$$

式 (1) 中 C_l 为升力系数， C_l' 为升力系数对攻角的倒数， $\theta_n = \theta_l + 2\pi(n-1)/z$ ， θ 为中心角，n 为叶片断面数，式 (2) 中 P 为功率，F 为轴向力，z 为叶片数， λ_0 为叶尖速比， μ 为翼型升阻比倒数。各式中其它参数如图 2 和图 3 所示[4~7]，均为叶片任意断面位置 r 的函数，符号上方带横线的各参数为其无因次量。

2 风力机风轮粒子群算法的优化过程

粒子群优化 (Partical Swarm Optimization) 算法是近年来发展起来的一种新的进化算法。该算法将从初始化的随机解出发不断迭代更新，最终找到最优解。迭代中粒子根据如下两个公式来更新自己的速度和新的位置：

$$v_{id}^k = w_{id}^{k-1} + c_1 \text{rand}_1 (pbest_i - x_{id}^{k-1}) + c_2 \text{rand}_2 (gbest - x_{id}^{k-1})$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (3)$$

式中 $i=1,2,\dots,m$; $d=1,2,\dots,n$; m 为粒子的个数; n 是解向量的维数。vi 是粒子的速度，xi 是粒子的位置, pbest 和 gbest 个体极值和全局极值，c1 和 c2 通常等于 2，rand1 和 rand2 是两个独立的介于 [0,1] 之间的随机数; w 是动量项系数，调整其大小可以改变搜索能力的强

弱，本文取 1。

本文以水平轴风力机为研究对象，其对应参量和优化目标如下：

为使各个截面的弦长和安放角能够连续光滑分布，对弦长 b 和安放角 φ 分别按照线性和贝塞尔曲线进行了分布，其约束方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{\min} \leq b_{root} \leq b_{\max} \\ b_{\min} \leq b_{tip} \leq b_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi_{root} \leq \varphi_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi_{tip} \leq \varphi_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi_{1contr} \leq \varphi_{2contr} \leq \varphi_{\max} \\ r_{\min} \leq r_{1contr} \leq r_{2contr} \leq r_{\max} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中： b_{root} 、 b_{tip} 、 φ_{root} 、 φ_{tip} 分别为叶根和叶尖截面处的弦长和安放角， φ_{1contr} 、 φ_{2contr} 、 r_{min} 、 r_{max} 为贝塞尔两个控制点坐标（半径为横坐标，安放角为坐标）。只需按约束给定这 8 个变量值，所有截面的弦长和安放角即都确定。并以风力机的额定出力为目标函数，因此适应度函数为：

$$P(b, \varphi) = \frac{1}{2} \rho V_n^3 \pi R^2 C_p(V_n, b, \varphi) \quad (5)$$

依据上述参量与优化目标，粒子群算法的优化过程流程图如下所示：

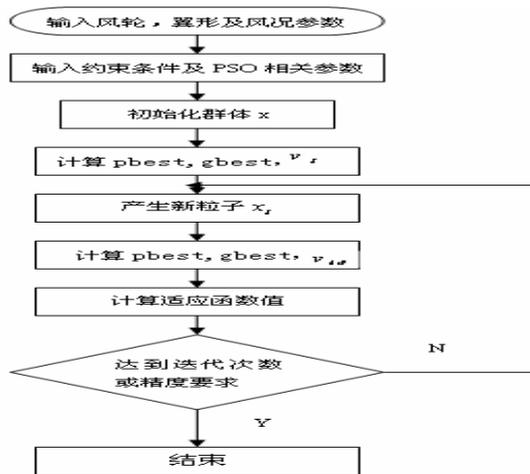


Figure4. Flow chart of the optimization program

图 4. 粒子群算法流程图

3 气动优化设计的 PSO 实现

3.1 气动外形优化设计的 PSO 实现

本文采用风力机专用翼型 S809，在某给定风频条件下具体设计一 1.5MW 的恒速变桨风力机，优化设计其气动外形。该机组的主要气动与几何参数为：直径 $D=70m$ ，额定风速 $V_0=12m/s$ ，切入风速 $V_{in}=3m/s$ ，切出风速 $V_{out}=25m/s$ ，额定转速 $n=18.8rpm$ ，额定功率 $W=1500kW$ ，叶片数 $b=3$ 。

为提高计算运行的速度，本文采用数组化进行编程运行。基于问题的要求，每个粒子设为 8 维的实数向量，并采用相对变量的形式设定初始化位置，为保证易于搜索全局最优解，初始速度取设定范围的 10%—20%，基于风力机优化设计的复杂程度，种群大小取 40，迭代次数为 100。

3.2 桨距气动优化设计与计算的 PSO 实现

对于大型恒速变桨风力机组，当风速低于额定风速时，应使风轮的桨距角向负方向调节，来维持最佳攻角，以提高风能利用系数。即 $V < V_0$ 时，以各个风速下需调节的变桨角为搜索变量，目标函数为： $f_1(\Delta\varphi) = C_p(\Delta\varphi, V)$ ，给出变桨角 $\Delta\varphi$ 的约束范围： $\varphi_{\min} < \Delta\varphi < \varphi_{\max}$ 搜索使 $f_1(\Delta\varphi)$ 达到最大值时的值，即得到各个风速下调桨距的角度。

当风速高于额定风速时，应使风轮的桨距角向正方向调节，攻角变小，减小风能利用系数来保证额定功率的输出。即 $V > V_0$ 时，求出各欲设计风速下应满足的各个 C_p 值，使其作为目标向量，各风速下应满足的变桨角作为搜索变量，目标函数为两个向量差的模： $f_2(\Delta\varphi) = |C_p(\Delta\varphi, V) - C_p|$ 给出安放角 φ 的约束范围： $\varphi_{\min} < \Delta\varphi < \varphi_{\max}$ 搜索使 $f_2(\Delta\varphi)$ 达到最小值零时的 $\Delta\varphi$ 值，即得到各风速下调桨距的角度。

风轮经桨距调节后，所改变的只是其各径向位置处的叶片安放角。根据调桨后安放角的更新和原额定的叶片气动与几何参数（直径，弦长，翼型及其气动性能系数），即可计算风轮在各风速下的气动性能。

4 气动优化设计计算结果与分析

4.1 气动外形优化设计的结果

基于上述理论，应用图 4 所示的流程图对 1.5MW 的风力机风轮（叶片）气动外形进行了优化设计，其设计结果如表 1 所示。

Table 1. The results of optimal design
表 1. 优化设计结果

半径/m	安放角/(°)	弦长/m	翼型
7	31.0726	4.2966	S809
8.75	25.2023	4.1311	S809
10.5	19.7126	3.9657	S809
12.25	15.0836	3.8002	S809
14	11.5415	3.6437	S809
15.75	8.9332	3.4693	S809
17.5	6.9809	3.3038	S809
19.25	5.4600	3.1384	S809
21	4.2228	2.9729	S809
22.75	3.1762	2.8074	S809
24.5	2.2610	2.6420	S809
26.25	1.4387	2.4765	S809
28	0.6832	2.3110	S809
29.75	-0.0234	2.1456	S809
31.5	-0.6938	1.9801	S809
33.25	-1.3373	1.8147	S809
35	-1.9606	1.6492	S809

4.2 桨距气动优化设计与计算结果

同理应用 PSO 流程图，搜索出 $\Delta\phi$ 后，根据桨距调节公式 $\phi(v) = \phi(v_n) \pm \Delta\phi(v)$ ，结合额定工况的叶片气动与几何参数，即可计算出风轮在各风速下的气动性能：风能利用系数 $C_p(v)$ ，轴向力系数 $C_t(v)$ ，功率特性 $P(v)$ 和轴向力特性 $F(v)$ 。

各风速下桨距调节设计计算结果以及气动性能曲线分别如表 2 和图 5-7 所示。

Table 2. The design results with the pitch regulation
表 2. 桨距调节设计计算结果

风速 (m/s)	变桨角 (°)	C_p	C_t	P/KW	F/KN
3	-10.0073	0.3226	0.4083	20.5310	8.6619
4	-9.1104	0.3520	0.4551	53.102	17.164
5	-8.0320	0.3730	0.4914	109.90	28.958
6	-6.5501	0.4077	0.5636	207.58	47.826
7	-5.4000	0.4280	0.6200	346.04	71.611
8	-4.1773	0.4522	0.7149	545.75	107.85
9	-3.0162	0.4379	0.6542	752.48	124.91
10	-1.7923	0.4293	0.6242	1011.9	147.131
11	-0.8344	0.4068	0.5614	1276.3	160.12
12	0.0000	0.3980	0.5411	1621.0	183.67
13	1.0846	0.3130	0.3937	1621.0	156.84
14	2.4591	0.2506	0.3044	1621.0	140.63
15	4.1025	0.2038	0.2428	1621.0	128.77
16	6.0488	0.1679	0.1978	1621.0	119.36
17	7.4098	0.1400	0.1641	1621.0	111.79
18	8.9561	0.1179	0.1379	1621.0	105.32
19	9.7264	0.1003	0.1174	1621.0	99.90
20	11.2140	0.0860	0.1010	1621.0	95.23
21	12.5137	0.0743	0.0877	1621.0	91.165
22	13.8915	0.0646	0.0767	1621.0	87.505
23	15.0626	0.0565	0.0676	1621.0	84.294
24	16.3922	0.0497	0.0600	1621.0	81.464
25	17.4609	0.0440	0.0537	1621.0	79.113

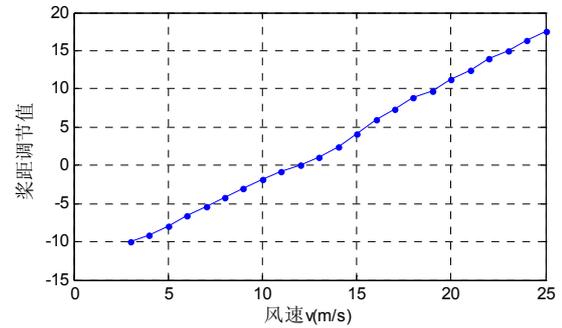


Figure 5. Curve: the pitch regulation of blade
图 5. 叶片桨距调节曲线

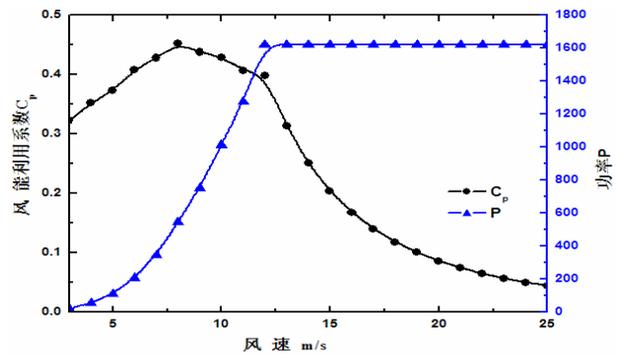


Figure 6. Curve: power coefficient and power
图 6. 功率系数和功率曲线

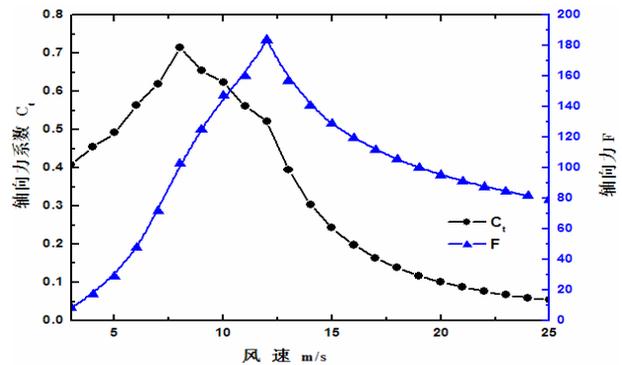


Figure 7. Curve: the axial force coefficient and axial force
图 7. 轴向力系数和轴向力曲线

4.3 结果分析

(1) 从气动外形优化设计的结果（见表 1）可以看出，基于有限叶片变量的气动模型与粒子群算法相结合的优化设计计算方法设计出的风力机叶片，其安放角和弦长沿叶片展向分别按贝塞尔曲线和线性进行分布，这与同类型同功率风力机沿叶片展向所设计的安放角和弦长分布情况趋势一致，说明了本文的优化设计计算方法是可行的。

(2) 从桨距气动优化设计的结果(见图5)可以看出,当风速小于本文的额定风速12m/s时,桨距角需往负方向调节;当风速大于本文的额定风速12m/s时,桨距角需往正方向调节,这与桨距角调节理论相吻合。

(3) 从桨距气动优化设计的计算结果(见图6、图7)可以看出,计算出的 $C_p(V)$ 、 $C_t(V)$ 在风速等于8m/s时达到最大值,随着风速的逐渐增大其值逐渐减小;功率P和轴向力F从切入风速到额定风速呈上升趋势,从额定风速到切出风速,由于对桨距进行调节功率P保持不变,轴向力F逐渐减小。这与现行风力机桨距调节的气动性能变化曲线变化一致。从而进一步说明本设计计算方法的可行性。

5 结论

(1) 本文采用基于有限叶片变环量的气动模型,结合粒子群算法对大型风力机桨距调节进行了气动优化设计和计算,优化设计计算出的特性变化趋势与实际风力机运行相符,证明了该设计计算方法的可行性和有效性。

(2) 为保证设计结果为全局最优解,并加快搜索的速度,文中采用了粒子群算法,这种方法在风力机气动优化过程中,可以更快收敛于最优解,保证了解

的质量。

References (参考文献)

- [1] D. Le Gourieres, Wind Power Plant – Theory and Design[M]. Pergamon Press Inc, New York.1982.
- [2] He Dexin.etc. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [M], Beijing: National Defence Industry Press,2006 (Ch). 贺德馨等,风工程与工业空气动力学[M],北京:国防工业出版社,2006.
- [3] Ye Hangye. Control Techniques for a Wind Turbine-generator Set [M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2002 (Ch). 叶杭冶,风力发电机组的控制技术[M],北京:机械工业出版社,2002.
- [4] Cheng Zhaoxue, Ye Zhiquan, Chen Jingyi, and Bai Shibao, Aerodynamic Optimization for the Rotor of Horizontal-Axis Wind Machine[J]. *Proceedings of the International Conference on New and Renewable Energy*, Beijing.1990.P306-312.
- [5] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook[M], John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.2001.
- [6] Spera D A, ed., Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering[M], ASME Press, New York. 1994.
- [7] Kramer R, Archer R, Modelling Approaches for Flow over a Wind Turbine Blade[J], *Wind Engineering*, Vol 28, No. 3, 2004, P311-312.
- [8] Cheng Zhaoxue, Yang Congxin, Li Rennian, A Numerical Method In Aerodynamic Computation For Wind Turbine Rotor[J], *Mechanics in Engineering niversity*, Vol.29, No. 6, 2007, P44-47 (Ch). 程兆雪, 杨从新, 李仁年, 风力机风轮气动计算中的一种数值解法, [J], *力学与实践*, Vol.29, No. 6, 2007年第六期 P44-47.