

20 kW 定桨距风力机叶片优化设计*

刘占芳 周振凯 邓智春

(重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

【摘要】 以设计攻角作为变量,在不超过额定功率和基本运行风速范围内,考虑风场风速的概率分布,建立了以年发电量最大为目标的优化模型,采用遗传算法对 20 kW 定桨距风力机叶片外形进行了优化设计。通过对 3 叶片定桨距 20 kW 风力机的气动性能评价以及与 NREL 的同型风力机的对比表明,优化后的风力机具有更好的气动性能,表明了该优化方法在设计定桨距风力机中的优越性。

关键词: 定桨距 风力机 叶片 优化设计 主动失速 遗传算法

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0121-04

Optimal Design on 20 kW Constant-pitch Wind Turbine Blades

Liu Zhanfang Zhou Zhenkai Deng Zhichun

(College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract

A method of making design attack angles as a variable was presented. Considering the wind speed probability distribution of wind farm, an optimization model with the objective of maximum annual energy production was established in the range of rated power and basic operating wind speed. The blade geometry of a 20 kW constant-pitch wind turbine was optimized by using genetic algorithm according to the model. Through the evaluation of the aerodynamic performance of 20 kW constant-pitch wind turbine and the comparison with the same type wind turbine of NREL, the results showed that optimized wind turbine had a better aerodynamic performance, which illustrated the advantages of the method in the design process of constant-pitch wind turbine.

Key words Constant-pitch, Wind turbine, Blades, Optimal design, Active stall, Genetic algorithm

引言

定桨距风力机的叶片与轮毂固定连接,风速变化时,桨叶的桨距角不能随之变化,因而,定桨距风力机是利用桨叶的自动失速特性来限制风力机的功率输出,实现与发电机的功率匹配。定桨距叶片气动设计时,不但要考虑年发电量最大而且更应该注意限制功率输出。中小型风力发电机为取得最大成本效益并保证系统安全、减少变桨和偏航等控制机构的组件,定桨距叶片的气动外形设计尤为关键。

早期定桨距风力机叶片优化设计主要是 Glauert 方法和 Wilson 方法^[1-2],其缺点是未考虑实际风速的概率密度分布,不能使所设计的风力机年

发电量最大。因此现代定桨距风力机的设计很少采用上述两种方法。

现代定桨距风力机的叶片设计考虑了风场风速的概率分布,设计目标为满足额定功率的要求下,年发电量最大^[3]。但是此方法仍然是取翼型升阻比最大攻角为设计攻角,致使很难通过失速来限制功率。而且实际上随着风速不同,风力机的攻角也不断变化,而未考虑偏离设计攻角时的功率。

本文提出一种定桨距风力机叶片气动优化设计的方法,即把设计攻角作为变量来处理,在不超过额定功率的前提下,以年发电量最大为优化目标,采用遗传算法对 20 kW 定桨距风力机叶片进行优化设计。

收稿日期: 2010-07-14 修回日期: 2010-10-19

* 重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC2008AC3105)

作者简介: 刘占芳,教授,博士,主要从事风力机空气动力学、结构动力学和冲击动力学研究, E-mail: zhanfang@cqu.edu.cn

1 叶片设计的气动分析模型

片条理论^[1,4]综合了动量理论和叶素理论,是水平轴风力机气动性能计算的主要方法。根据片条理论,轴向和切向诱导因子的关系为

$$a = \frac{Bc(C_l \cos\phi + C_d \sin\phi)}{8\pi r \sin^2\phi + Bc(C_l \cos\phi + C_d \sin\phi)} \quad (1)$$

$$a' = \frac{Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)}{8\pi r \sin\phi \cos\phi - Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)} \quad (2)$$

式中 a, a' ——轴向、切向诱导因子

B ——叶片数 c ——弦长, m

ϕ ——来流角, ($^\circ$) r ——截面位置, m

C_d, C_l ——翼型的阻力、升力系数

来流角满足的关系为

$$\tan\phi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (3)$$

式中 Ω ——风轮转速, r/min

U ——来流风速, m/s

风轮产生的功率为

$$P = \int_0^R \frac{1}{2} \rho W^2 Bc(C_l \cos\phi - C_d \sin\phi) \Omega r dr \quad (4)$$

式中 ρ ——空气密度, kg/m³

W ——相对风速, m/s

R ——风轮半径, m

所以,风力机的功率取决于相对风速 W 、叶片数 B 、弦长 c 、来流角 ϕ 、风轮转速 Ω 、翼型的升力系数 C_l 、翼型的阻力系数 C_d 以及风轮半径 R 。

2 叶片优化设计

2.1 叶片优化设计的目标函数

相对风速 W 与来流风速 U 的关系为

$$W = \frac{U(1-a)}{\sin\phi} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并利用式(1)可得不显含诱导因子的功率表达式

$$P = \int_0^R \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8\pi r U \sin\phi}{8\pi r \sin^2\phi + Bc(C_l \sin\phi + C_d \cos\phi)} \right)^2 \cdot Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi) \Omega r dr \quad (6)$$

将式(1)和式(2)分别代入式(3)可得

$$\frac{U}{\Omega r} = \frac{8\pi r \sin^2\phi + Bc(C_l \cos\phi + C_d \sin\phi)}{8\pi r \sin\phi \cos\phi - Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)} \quad (7)$$

式中升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 都是攻角的函数。风洞试验中难以获得大攻角下的翼型升阻系数,按风力机实际运行情况,可考虑攻角在 $-5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 范围内变化。对于一种翼型,在某一雷诺数下的一定攻角范围内用三次多项式分段拟合翼型升阻系数的试验数据,即把升阻系数分别表达成攻角

的表达式 $C_l = f_1(\alpha)$ 和 $C_d = f_2(\alpha)$, 其中 $f_1(\alpha)$ 、 $f_2(\alpha)$ 都是关于 α 的三次多项式。将它们代入式(7)可获得攻角的关系为

$$f(\alpha, U, \Omega, r, c, \beta) = 0 \quad (8)$$

再结合式(6),得到不显含攻角的功率表达式为

$$P = P(U, \Omega, R, c, \beta) \quad (9)$$

进行风轮设计时,首先确定来流风速 U 、风轮转速 Ω 和风轮半径 R , 这样风轮功率只依赖于叶片弦长 c 和扭角 β , 据此可以建立优化设计的数学模型。

对于中小型定桨距风力机而言,功率输出和年发电量是风力机叶片气动优化的两个目标。本文优化目标为在一定攻角和基本运行风速范围内,在不超额定功率前提下,保证年发电量最大。这里风速分布的概率密度采用威尔布(Weibull)分布函数,其形式为

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{v}{C} \right)^{K-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} \quad (10)$$

式中 K ——Weibull 形状参数

C ——Weibull 尺度参数, m/s

v ——风速, m/s

取优化的数学模型为

$$\begin{cases} \max N = T \int_{v_{in}}^{v_{out}} P f(v) dv \\ \text{s. t. } P_{\max} \leq P_{\text{rated}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 N ——年发电量 v_{in} ——切入风速, m/s

v_{out} ——切出风速, m/s

T ——全年有效工作时间

2.2 应用遗传算法优化叶片的弦长和扭角

采用遗传算法^[5]对叶片的弦长和扭角进行搜索。采用遗传算法求解有如下特点:遗传算法在进化搜索过程中基本不利用外部信息,仅以适应函数作为衡量标准。本文采用在适应函数 Φ 中构造外点罚函数法来处理约束条件适应函数,其表达式为

$$\min \Phi = -N + \varepsilon^k \max[(P_{\max} - P_{\text{rated}}), 0] + \varepsilon^k \min[(\alpha + 5), 0] + \varepsilon^k \max[(\alpha - 30), 0] \quad (12)$$

约束条件为

$$\begin{cases} c_{\min} \leq c_1 \leq c_2 \leq \dots \leq c_{20} \leq c_{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_{20} \leq \beta_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon^k = \infty$$

式中 ε ——罚因子

为进一步检验本文 20 kW 定桨距风力机叶片的优化结果,下面与 NREL20 kW 水平轴风力机^[6-8]的风轮设计作比较,其中风轮的基本参数如表 1 所示。取最小弦长为 $c = 0.356$ m。

取种群大小为 200,应用遗传算法,计算得到优化的弦长和扭角如表 2 所示。表 2 中,0 ~ 0.724 m 属于轮毂段,0.724 ~ 1.258 m 之间属于轮毂到翼型的过渡段。

2.3 优化结果分析与比较

对本文设计的风轮进行气动性能评价并与 NREL 的 20 kW 风力机进行比较。图 1 和图 2 分别为弦长和扭角的对比,图 3 和图 4 为气动性能的比较。

表 1 20 kW 风力机风轮的基本设计参数

Tab.1 Basic design parameters of 20 kW wind turbine

参数	数值
叶片数量	3
风轮半径 R/m	5.03
额定功率 P/kW	20
风轮转速 $\Omega/r \cdot \min^{-1}$	72
翼型系列	S809
安装锥角 $\beta_0/(\circ)$	3.4
空气密度 $\rho/kg \cdot m^{-3}$	1.225
切入风速 $v_{in}/m \cdot s^{-1}$	4
切出风速 $v_{out}/m \cdot s^{-1}$	18
Weibull 形状参数 K	2
Weibull 尺度参数 $C/m \cdot s^{-1}$	8.186 6

表 2 叶片的弦长和扭角

Tab.2 Chord and twist angle of blade

截面位置 r/m	弦长 c/m	扭角 $\beta/(\circ)$
0	0.500	0
0.724	0.500	0
0.838	0.538	32.00
0.968	0.582	29.00
1.258	0.680	21.50
1.500	0.659	15.50
1.750	0.638	11.00
2.000	0.616	8.10
2.250	0.595	5.80
2.500	0.573	4.80
2.750	0.552	4.20
3.000	0.530	3.70
3.250	0.509	3.20
3.500	0.487	2.80
3.750	0.466	2.25
4.000	0.444	1.75
4.250	0.423	1.30
4.500	0.401	0.90
4.750	0.380	0.25
5.030	0.356	-0.20

从图 1 可以看出,本文设计的叶片弦长比 NREL 20 kW 风力机的叶片弦长有所减小。从图 2 可以看出,本文设计的扭角大于 NREL 20 kW 风力机的叶片扭角。

从图 3 可以看出,低风速下的功率曲线相对 NREL 风力机有所改善,表明本文提出的风力机有良好的启动性能。随着风速增大,风轮的功率输出

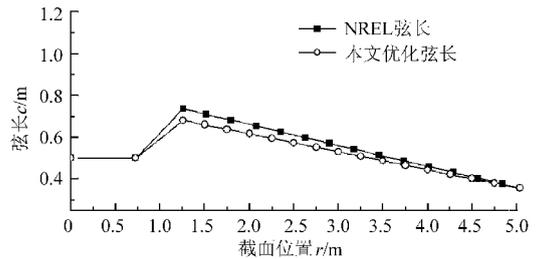


图 1 叶片弦长沿展向的分布

Fig.1 Spanwise distribution of blade chords

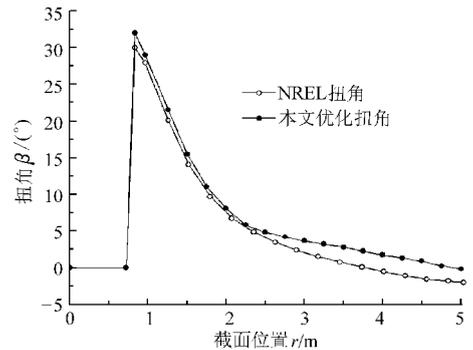


图 2 叶片扭角沿展向的分布

Fig.2 Spanwise distribution of blade twist angles

比较平稳,功率始终控制在额定功率 20 kW 内,体现了良好的失速特性。假设当风速在工作时间范围内时风力机不停机工作,且不考虑机械损耗,设计的风力机全年发电量为 68 078 kW·h,高于 NREL 20 kW 风力机的 65 497 kW·h,提高了 3% 的功率,效果显著。

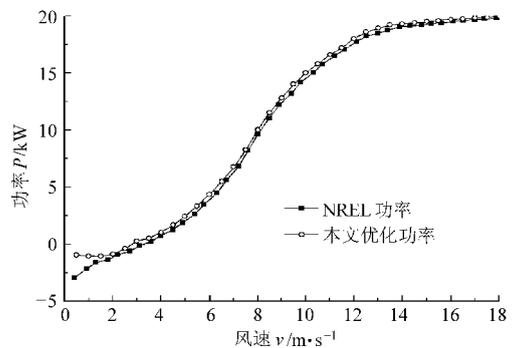


图 3 风力机功率曲线

Fig.3 Power curves vs wind speeds of turbines

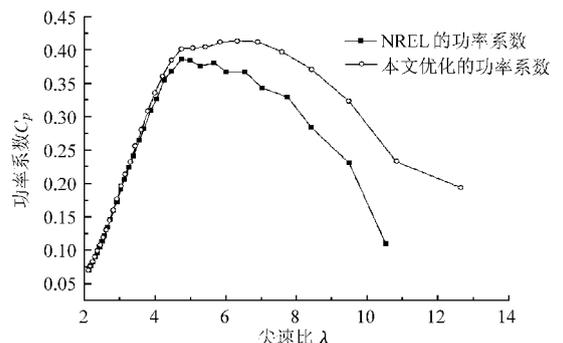


图 4 功率系数与尖速比的关系

Fig.4 Power coefficients vs tip-speed ratio of turbines

图4表示风力机的功率系数与尖速比的关系,本文设计的风力机运行尖速比范围较NREL的风力机更宽,更大程度上保证了较高的风能利用率,因此,虽然叶片的弦长有所减少,仍然达到了年发电量更高的设计目标。图5表示风力机的推力系数与尖

速比的关系,本文设计的风力机推力明显小于NREL风力机的推力,有利于减轻风轮和塔架的负荷,节约其成本并延长使用寿命。

3 结束语

提出了不以恒定攻角设计,而把攻角当作变量处理的方法,更加符合定桨距风力机的实际运行情况。在不超过额定功率和基本运行风速的范围内,考虑风场风速的概率分布,以全年发电量最大为优化设计目标,建立了定桨距风力机关于叶片弦长和扭角的气动优化模型,并利用遗传算法对20 kW定桨距风力机叶片进行优化设计。通过对20 kW定桨距3叶片风力机的气动性能评价以及与NREL的同功率风力机的对比表明,叶片优化设计的风力机具有更好的气动性能。

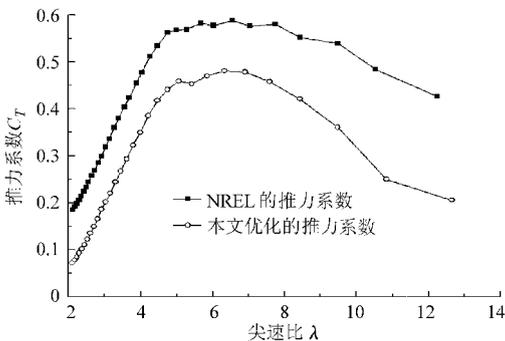


图5 推力系数与尖速比的关系

Fig. 5 Thrust coefficients vs tip-speed ratio of turbines

参 考 文 献

- Wilson R E, Lissaman P B S, Walker S N. Aero dynamic performance of wind turbines [M]. Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, 1976.
- Spera D A. Wind turbine technology [M]. New York: ASME Press, 1994.
- 刘雄,陈严,叶枝全. 水平轴风力机气动性能计算模型[J]. 太阳能学报,2005,26(6):792~800.
Liu Xiong, Chen Yan, Ye Zhiquan. Research on the aerodynamic performance prediction model for horizontal axis wind turbine [J]. Acta Energiæ Sinica, 2005, 26(6):792~800. (in Chinese)
- 刘雄,陈严,叶枝全. 风力机桨叶总体优化设计的复合形法[J]. 太阳能学报,2001,22(2):157~161.
Liu Xiong, Chen Yan, Ye Zhiquan. Wind turbine blade global optimum design using complex method [J]. Acta Energiæ Sinica, 2001, 22(2):157~161. (in Chinese)
- 刑文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- 刘雄,陈严,叶枝全. 遗传算法在风力机风轮优化设计中的应用[J]. 太阳能学报,2006,27(2):180~184.
Liu Xiong, Chen Yan, Ye Zhiquan. Application of genetic algorithms to HAWT rotor blades optimization [J]. Acta Energiæ Sinica, 2006, 27(2):180~184. (in Chinese)
- 杜朝辉, Selig M S. 一种水平轴风轮叶片的气动设计方法[J]. 太阳能学报,2000,21(4):364~369.
Du Zhaohui, Selig M S. An aerodynamic design method for horizontal axis wind turbine [J]. Acta Energiæ Sinica, 2000, 21(4):364~369. (in Chinese)
- Selig M S, Tangler J L. Development and application of a multipoint inverse design method for horizontal axis wind turbines [J]. Wind Engineering, 1995, 19(2):91~105.
- Giguere P, Selig M S. Aerodynamic blade design methods for horizontal axis wind turbines [C]//13th Canadian Wind Energy Association Conference and Exhibition, Quebec, Canada, 1997.
- Emesto Benini, Andrea Toffolo. Optimal design of horizontal axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation[J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(4):357~363.

(上接第145页)

- 张敬平,钮伟民,叶扣贯. 肉类分解产物及检测现状[J]. 中国卫生检验杂志,2006,11(16):1405~1409.
Zhang Jingping, Niu Weimin, Ye Kouguan. Testing status and decomposition products of meat[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2006, 11(16):1405~1409. (in Chinese)
- Jennifer B, Ponder D, Bailey P. Colorimetric sensor arrays for volatile organic compounds[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(11):3591~3600.
- 黄星奕,李剑,姜松. 基于计算机视觉的稻谷品种数据库检索技术[J]. 农业机械学报,2005,36(10):94~96.
Huang Xingyi, Li Jian, Jiang Song. Image retrieval of rice varieties database using computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):94~96. (in Chinese)