

低风速适用型水平轴风力机气动性能优化与试验

唐新姿, 孙松峰, 李鹏程, 陆鑫宇, 彭锐涛

(湘潭大学机械工程学院, 湘潭 411105)

摘要: 为开发低风资源适用型风力机, 以 100 W 水平轴风力机为研究对象, 分析不同设计叶尖速比和设计攻角对风轮变风况气动性能的影响; 考虑低风速地区风资源数据统计特点, 以提高年发电量和降低启动风速为目标, 以设计叶尖速比、设计攻角、叶片弦长和扭角为变量, 采用 NSGA-II 算法进行全局多目标气动寻优; 开展风力机性能测试试验。结果表明, 优化后年发电量提高了 9.14%, 风轮启动转矩提高了 9.62%; 在不同负载条件下, 优化叶片功率输出均有明显提高, 启动风速由 3.84 m/s 降低到 3.03 m/s; 该方法避免设计陷入局部优化, 提供一种低启动风速与高功率输出矛盾解决方案, 为低风速水平轴风力机设计与应用提供重要参考。

关键词: 风力机; 发电; 优化; 低风速; 启动性能; 多目标优化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.12.026

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-12-0218-06

唐新姿, 孙松峰, 李鹏程, 陆鑫宇, 彭锐涛. 低风速适用型水平轴风力机气动性能优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 218—223 doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.12.026 <http://www.tcsae.org>
Tang Xinzi, Sun Songfeng, Li Pengcheng, Lu Xinyu, Peng Ruitao. Aerodynamic optimization and experiment of horizontal axis wind turbine for low wind speed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(12): 218—223. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.12.026 <http://www.tcsae.org>

0 引言

风轮是风力机系统核心装置, 叶片气动设计对整机效率与综合性能起着极其重要的作用。中国低风速(2~6 m/s)区域面积占陆地总面积 85%, 对于风资源欠佳供电需求迫切地域, 低风速风力机能有效补充电力, 已经受到国内外广泛关注和重视。研究低风速风力机气动性能对于推进小型风电技术发展实现分散式新能源策略具有重要意义。

针对风力机叶片气动设计国内外学者开展了广泛研究。陈进等^[1]建立风力机输出成本和能量计算模型, 以风力机单位能量输出成本为目标优化叶片外形。汪泉等^[2]对翼型进行多攻角优化。刘雄等^[3]考虑风场风速分布概率以弦长扭角参数 Beizer 拟合控制点为变量, 以风力机能量输出最大为目标进行优化设计。章嘉麟等^[4]将叶片弦长扭角参数化, 以 6 m/s 风能利用系数最大为目标进行优化。吴江海等^[5]研究了风场收益最大叶片优化方法。王同光、杨阳等^[6-9]以年发电量最大和叶片质量最轻为目标研究风力机叶片优化方法。王骥月等^[10]研究了仿生翼型风力机气动性能。程珩等^[11]采用混合粒子群算法以风力机叶片额定工况下的风能利用系数最大为目标设计叶片。戴巨川等^[12]综合考虑叶片外形参数与运行特性以降低额定风速。郑玉巧等^[13]以叶片弦长、扭角与铺层厚度形状参数为变量, 以叶片质量最轻为目标设计叶片。Eke 等^[14]以叶片外形参数为变量, 以风力机能量输出最大为目标设计叶片。Polat

等^[15]在风轮直径不变、特定风速和风轮转速条件下, 以发电量最大为目标, 以叶片轮廓为变量优化叶片。Ebert 等^[16-17]研究了小型风力机低风速启动性能。Wang 等^[18]分析了叶片优化中翼型的最佳攻角。Bavanish 等^[19]考虑了桨距角、叶尖速比、升力系数与阻力系数与叶片强度进行叶片设计。Hendriana 等^[20]通过改变叶片宽度与内外端倾斜角度优化风力机。Zhu 等^[21]提出降低能量成本同时提高叶片整体性能的多目标气动与结构优化方法。Hu 等^[22]研究在满足应力比、顶端挠曲与疲劳寿命条件下同时降低材料成本和叶片质量的叶片设计方法。Bottasso 等^[23]提出气动与结构多学科优化方法。Fischer 等^[24]以风力机推力、年发电量与叶片质量为目标优化叶片。综上所述, 现代风力机设计优化多针对大型风力机以年发电量最大、成本和载荷最小等为目标优化叶片几何外形。相对于大型风力机而言, 小型风力机技术发展迟缓。小型风力机通常不含复杂变桨变速控制系统, 为了获取较多风能, 叶片设计常采用较大叶尖速比以获得较大叶片扭转角, 进而获得较大启动转矩; 但较大扭转角将导致风轮发电效率低下, 常规设计方法无法调和启动与能量输出之间的矛盾, 且在设计过程中整机设计参数如设计叶尖速比、设计攻角通常依靠经验选取, 容易陷入局部优化, 存在一定局限性。

本文以 100 W 水平轴风力机为研究对象, 基于修正叶素动量理论建立风力机设计分析系统, 研究设计叶尖速比和设计攻角对风轮变风况气动性能影响规律; 基于低风速地区风资源数据统计特点, 考虑电机参数匹配, 将整机设计参数和叶片几何外形优化相结合, 以年发电量和启动转矩最大为目标, 以设计叶尖速比、设计攻角、叶片弦长和扭角分布为变量, 采用多目标遗传算法进行

收稿日期: 2017-11-25 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305377; 51475404)

作者简介: 唐新姿, 副教授, 主要从事风力发电技术研究。Email: xinzitang@163.com

全局气动寻优; 搭建风力机性能测试平台, 开展气动性能试验, 为低风速小型水平轴风力机设计与应用提供重要参考和依据。

1 风力机气动性能计算模型

1.1 修正叶素动量理论

叶素动量理论综合了叶素理论和动量理论, 是风力机气动性能计算的理论基础^[25]。

根据动量理论得到叶轮叶素转矩 Q 和推力 T :

$$dQ = 4\pi\rho U(1-a)a'\Omega r^3 dr \quad (1)$$

$$dT = 4\pi\rho U^2(1-a)ardr \quad (2)$$

式中 a 为轴向诱导因子; a' 为周向诱导因子; r 为叶素半径, m; ρ 为空气密度, kg/m³; U 为风速, m/s; Ω 为风轮转速, r/min。

同时, 由叶素理论得到叶轮叶素转矩和推力:

$$dQ = \frac{1}{2}B\rho U_T^2(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)crdr \quad (3)$$

$$dT = \frac{1}{2}B\rho U_T^2(C_l \sin\phi + C_d \cos\phi)crdr \quad (4)$$

式中 B 是叶片数; c 为弦长, m; C_l 是翼型升力系数; C_d 是翼型阻力系数; U_T 是相对风速, m/s; ϕ 是入流角, (°)。

综合考虑 Prandtl 叶尖损失与轮毂损失, 轴向与周向诱导因子表示为:

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ \frac{B[R-r]}{2r \sin\phi} \right\} \right] \quad (5)$$

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ \frac{B[r-r_{hub}]}{2r_{hub} \sin\phi} \right\} \right] \quad (6)$$

$$F = F_{tip} \cdot F_{hub} \quad (7)$$

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

$$a' = \frac{Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)}{8\pi r F \sin\phi \cos\phi - Bc(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)} \quad (9)$$

式中 F_{tip} 叶尖损失因子; F_{hub} 轮毂损失因子; R 为叶片半径, m; r_{hub} 轮毂半径, m。

当轴向因子大于 0.38 时, 采用 Glauert 修正, 采用下式计算轴向因子:

$$a = \frac{1}{2} [2 + k(1 - 2a_c)] - \frac{\sqrt{[2 + k(1 - 2a_c)]^2 + 4(ka_c^2 - 1)}}{2} \quad (10)$$

式中 $k = \frac{8\pi r F \sin^2\phi}{Bc}$, $a_c \approx 0.38$ 。

风能利用系数 C_p 由叶根积分到叶尖得到。

$$C_p(\lambda) = 8/\lambda^2 \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \lambda_r^3 a'(1-a) [1 - (C_d/C_l) \cot\theta] d\lambda_r \quad (11)$$

式中 θ 为扭角, (°)。

在风速为 U 时, 风力机产生的功率为

$$P(U) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 \eta C_p(\lambda) \quad (12)$$

1.2 翼型升阻力系数

采用 NACA4412 翼型, 100W 小型风力机平均弦长对

应雷诺数为 1×10^5 , 低攻角升阻力气动数据由 XFOIL 计算获得, 高攻角升阻力气动数据由 Viterna-Corrigan 和平板理论公式推导得到^[26]:

$$C_l = 2 \sin\alpha \cos\alpha \quad (13)$$

$$C_d = 2 \sin^2\alpha \quad (14)$$

式中 α 为攻角, (°)。

1.3 风轮启动转矩计算

在风轮静止到启动空转期, 以下关系式成立:

$$\alpha = \pi/2 - \theta \quad (15)$$

式(15)两边取正弦函数可得: $\sin\alpha = \cos\theta$, 入流角 $\sin\phi \approx 1$; 将翼型升阻力系数带入转矩公式, 可得简化后叶素启动转矩:

$$dQ = \frac{1}{2} \rho B(1-a)^2 U_0^2 c \sin(2\phi) r dr \quad (16)$$

同时, 综合考虑叶素理论、动量理论与角动量守恒可得周向因子:

$$a' = a \tan\theta \quad (17)$$

由攻角、扭角及升力系数与阻力系数之间的关系得轴向因子为:

$$a \approx \frac{1}{2} \sigma \cos^2\theta \quad (18)$$

对于小型风力机叶片来说, 扭角范围: $-5^\circ < \theta < 30^\circ$, 叶片实度 $\sigma < 0.2$, 并且两者从叶根到叶尖逐渐减小, $a' < a \ll 1$, 计算启动转矩时诱导因子可以忽略。

风力机处于启动状态与运行状态时风轮受力状况存在很大区别, 由于叶片设计时是高叶尖速比条件设计的, 风轮处于静止状态时, 叶片攻角较大, 叶素速度矢量不成立, 只有升力在静态叶片上产生转矩, 因此风轮启动转矩 Q 为

$$Q = \frac{1}{2} \int_{r_h}^R B \rho U^2 c r \sin 2\theta dr \quad (19)$$

1.4 基于风资源的年发电量计算

风资源评估是风电建设首要前提, 风资源好坏直接影响风力发电机预期发电量。应用 Weibull 函数描述当地风资源特点:

$$f(V_\infty) = (8760/C)k(V_\infty/C)^{k-1} \exp[-(V_\infty/C)^k] \quad (20)$$

式中 V_∞ 为自然来流风速, m/s; C 为形状系数; k 为尺度系数, 取值为 2。平均风速 V_a 为

$$V_a = C\Gamma(1+1/k) \quad (21)$$

根据低风速风场数据统计可知通常 V_a 低于 6 m/s, 且小型风力机风轮安装位置较低, V_a 取值为 4.5 m/s。

年发电量 AEP 计算如下式所示:

$$AEP = T \int_{V_{in}}^{V_{out}} p(V_\infty) f(V_\infty) dV_\infty \quad (22)$$

式中 $p(V_\infty)$ 是与风速 V_∞ 对应的功率输出, W; T 为风力机一年开机运行总时间, 8760 h; V_{in} 为风力机运行切入风速, m/s; V_{out} 为风力机运行切出风速, m/s。

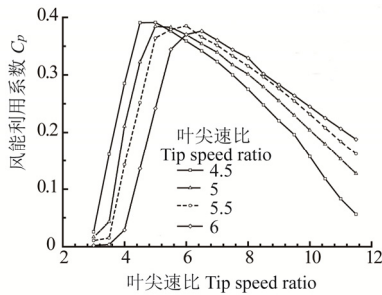
2 设计叶尖速比和设计攻角对气动性能的影响

设计叶尖速比和设计攻角是叶片外形设计必要参数, 为考虑电机参数匹配和变风况条件, 分析不同设计

叶尖速比和设计攻角对叶片气动性能的影响。风力机额定功率 100 W, 风轮半径 0.5 m, 叶片数目为 3。

2.1 设计叶尖速比对气动性能的影响

图 1 给出了不同设计叶尖速比(4.5、5、5.5 和 6) C_p 曲线对比。由图 1 可见, 设计叶尖速比增大, C_p 曲线右移。设计叶尖速比增大, 在叶尖速比小于 5.5 时, C_p 随之降低, 而在叶尖速比大于 5.5 时, C_p 随之增大。设计叶尖速比由 4.5 增加到 6, 低叶尖速比区域 C_p 最大降低 65.14%, 高叶尖速比区域, C_p 最大提高 234.39%。叶片高风性能与低风性能两者不可兼得, 叶片高风性能较好, 则低风性能较差。



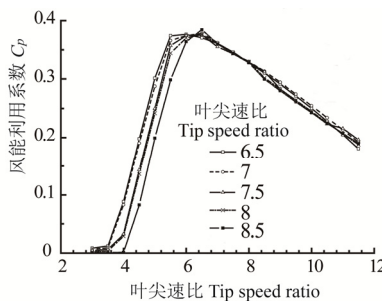
注: 设计攻角为 7°。Note: Design angle of attack is 7°.

图 1 不同设计叶尖速比的风能利用系数 C_p 曲线

Fig.1 Wind power coefficient C_p curves of different design tip speed ratios

2.2 设计攻角对气动性能的影响

图 2 为不同设计攻角(6.5, 7, 7.5, 8 和 8.5) C_p 曲线对比。由图 2 可知, 设计攻角增大, 叶片气动性能均有所降低, C_p 曲线随着攻角增大向坐标轴右边移动。在叶尖速比小于 6 时, 对比设计攻角 6.5 与 8.5 的 C_p 曲线, 前者的 C_p 明显高于后者; 且 C_p 随着设计攻角增加而降低。在叶尖速比大于 6 时, 设计攻角为 7 和 7.5 的 C_p 相差不大, 设计攻角为 8.5 的 C_p 最低。设计攻角由 6.5 增加到 8.5, 低叶尖速比区域 C_p 最大降低 58.17%; 高叶尖速比区域 C_p 最大提高 5.09%。值得指出的是, 考虑低风速地区自由来流湍流度较高时, 设计攻角选取较大, 叶片发生失速, 风力机风能利用系数下降, 叶片设计可以根据当地湍流度高低适当减小设计攻角。



注: 设计叶尖速比为 7。Note: Design tip speed ratio is 7.

图 2 不同设计攻角 C_p 曲线

Fig.2 C_p curves of different design angle of attack

3 优化设计方法

3.1 优化数学模型的建立

基于风资源统计特点, 以年发电量和启动转矩最大为优化目标, 以设计攻角、设计叶尖速比、叶片弦长和扭角

分布为变量, 进行多目标优化。

优化目标:

$$\text{Objective: Min } (-f_{\text{AEP}}(X), -f_Q(X)) \quad (23)$$

式中 $f_{\text{AEP}}(X)$ 表示年平均风速 4.5 m/s 时的年发电量 AEP; $f_Q(X)$ 表示风速 3 m/s 时的风轮启动转矩 Q 。

设计变量及约束条件为:

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (24)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \quad (25)$$

$$c_{\max} \geq c(i) \geq c(i+1) \geq c_{\min} \quad (26)$$

$$\beta_{\max} \geq \beta(i) \geq \beta(i+1) \geq \beta_{\min} \quad (27)$$

$$P(X) \leq 120W \quad (28)$$

式中下标 max 与 min 表示参数最大与最小值; λ 表示设计叶尖速比; α 表示设计攻角, (°); c 表示弦长, m; β 表示扭角, (°); i 表示截面编号; P 为风轮输出功率, W。

3.2 优化算法和求解流程

多目标遗传算法 NSGA-II 是一种以自然条件下生物竞争、生存为优化原型的全局寻优算法, 以优化目标为适应度函数控制个体生存与淘汰。遗传算法参数选择影响优化结果, 种群规模影响计算精度和效率, 杂交概率和变异概率则关系到算法收敛性和群体中个体多样性。综合考虑效率与精度的平衡, 在通过选取多组不同种群数(60, 100, 200)、杂交概率(0.85, 0.65, 0.45)和变异概率参数(0.02, 0.01, 0.05)对比计算后, 当 Pareto 前沿解集不再变化优化结果趋于稳定收敛时, 最终得到计算种群数、杂交概率和变异概率参数分别为 100, 0.65 和 0.01。图 3 给出了优化求解流程。

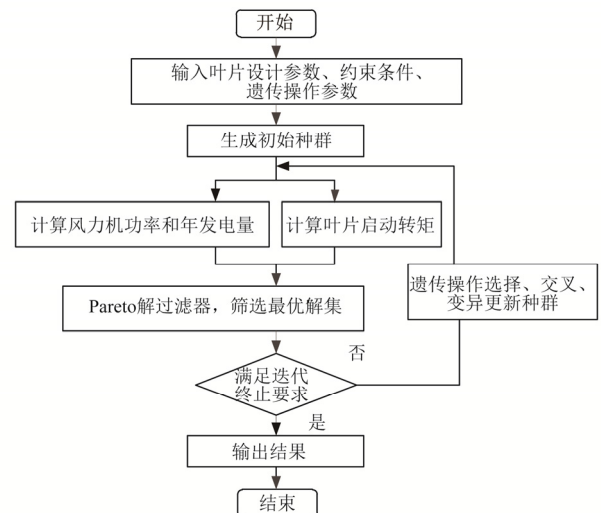


图 3 优化流程图

Fig.3 Optimization flow chart

首先输入功率、叶片数目、半径、翼型及气动数据等叶片设计参数、约束条件及遗传算法参数, 根据约束范围生成优化叶片设计攻角、设计叶尖速比、叶片弦长、扭角的初始种群, 计算年发电量和启动转矩适应度值函数, 筛选 Pareto 最优解, 判断是否收敛, 如果不收敛, 则进行选择交叉变异操作更新种群重复以上步骤。

4 结果与分析

4.1 优化前后叶片几何外形对比

图 4 为 Pareto 前沿和初始叶片。初始叶片设计叶尖

速比和设计攻角分别为 4.5 和 8.5; A 点为优化叶片, 其设计叶尖速比为 5.24, 设计攻角为 5.17。

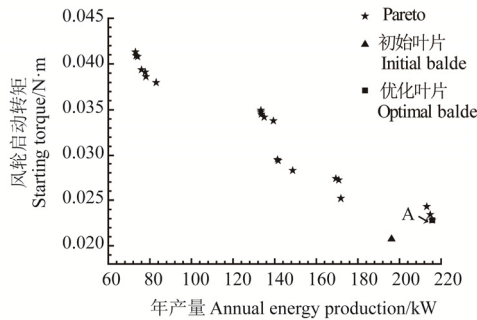
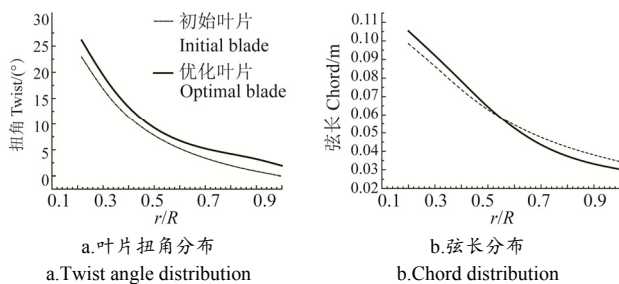


图 4 Pareto 前沿与初始叶片

Fig.4 Pareto front and initial blade

图 5 为优化前后叶片弦长和扭角分布对比。由图 5 可以看出, 在半径展向上, 优化叶片扭角均大于初始叶片扭角。在半径位置 $r/R < 0.55$ 时, 优化叶片弦长要大于初始叶片弦长; 而在半径位置 $r/R > 0.55$ 时, 优化叶片弦长要小于初始叶片弦长。



注: r 为叶片半径, R 为叶轮半径。

Note: r is radius of blade element, R is radius of blade.

图 5 优化前后叶片几何参数

Fig.5 Blade geometric parameters before and after optimization

4.2 优化前后年发电量和风轮启动转矩对比

年平均风速为 4.5 m/s, 启动风速为 3 m/s, 优化前后风轮转矩分别为 0.0208、0.0228 N·m, 优化后风轮启动转矩提高了 9.62%; 优化后综合气动性能改善, 优化前后年发电量分别为 197、215 kW·h, 优化后提高了 9.14%。这是由于根据当地低风风资源特点进行设计参数与几何参数综合优化, 初始叶片设计叶尖速比和设计攻角分别为 4.5 和 8.5; 优化后叶片设计叶尖速比为 5.24, 设计攻角为 5.17, 设计叶尖速比增加, 设计攻角减小, 风力机的风能利用系数有所增加; 同时, 由图 5 可以看出, 优化叶片扭角增大, 叶尖弦长减小而叶根弦长增大, 因此年发电量提高, 同时启动转矩增加。

4.3 优化前后风能利用系数对比

图 6 给出了优化前后 C_p 曲线对比。由图 6 可知, 在整个运行风况范围内, 优化后风轮 C_p 均有所提高, 其中高叶尖速比区域最大提高了 52.3%, 低叶尖速比区域最大提高了 13.95%。优化叶片在叶尖速比与高叶尖速比区域风能利用系数的提高表明风力机年发电量提高。

值得指出的是, 考虑低风地区存在湍流的情况时, 需要根据具体问题分析湍流度对叶片性能的影响。湍流度的增大和雷诺数的提高对翼型气动特征影响相似, 在常规较

低雷诺数下, 湍流度增加能够提高翼型气动性能, 增大升力系数和失速角; 在较高雷诺数下, 湍流强度增加, 叶片吸力面压力面压差减小, 风轮转矩减小, 风能利用系数下降。此外, 由于湍流风的扰动, 叶片需要承受非恒定载荷波动和湍流循环应力的影响。

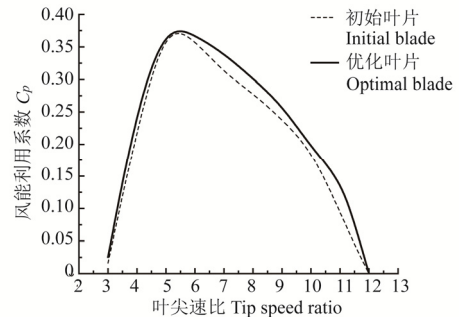


图 6 优化前后 C_p 曲线对比

Fig.6 Comparison of C_p curves before and after optimization

5 风力机气动性能测试试验

搭建风力机性能测试试验平台, 测试数据采集方案如图 7 所示。

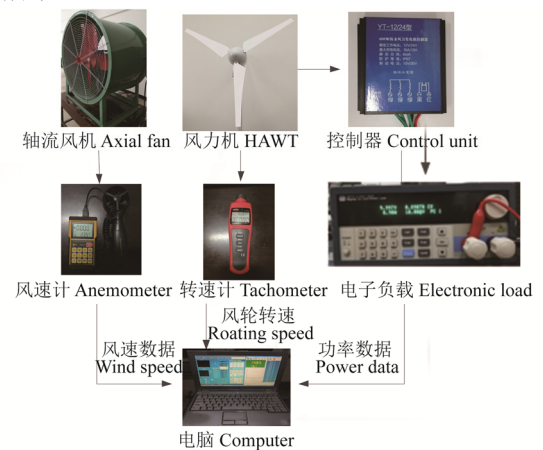


图 7 风力机气动性能测试方案

Fig.7 Wind turbine performance test scheme

试验平台由轴流风机、变频器、被测风力机、三相永磁交流电机、控制器、电子负载、风速计、数据采集系统等组成, 各仪器参数及精度如下: 轴流风机功率 5.5 kW、风量 50 000 m³/h; 变频器频率范围为 0~50 Hz、频率分辨率为 0.01 Hz; 电机额定功率 100 W, 额定转速 750 r/min; 控制器输入最大交流电压 AC30、输出直流电压 DC12V/24V、最大充电电流 16 A; 电子负载额定输入功率 300 W、额定电流 0~30 A、额定电压 0~150 V; 风速计风速范围 0.3~45 m/s、风速精度 $\pm 3\% \pm 0.1 \text{ dgts}$ 、采样时间间隔 1~19 s。风轮直径 1 m, 叶片采用 3D 打印加工, 材料为 PLA, 表面打磨。

通过变频器对轴流风机变频调节获得不同风速, 选择距离轴流风机多组不同位置平面内 $\pm X$, $\pm Y$ 坐标方向各选择 4 点及中心位置共 17 点, 由风速计测量 10 min 实时风速, 计算平均风速和方差, 选取风速波动最小平面的平均风速作为实际风速大小; 转速计测量风轮转速;

电子负载仪采用 0~12 V 定电压模式,在不同风速分别测试 10 min 实时功率;所有数据直接传输电脑记录存档。

图 8 给出了定电压 12、9 和 8 V 共 3 种不同负载条件(其他电压模式规律相似不累述)初始叶片与优化叶片功率曲线对比。由图 8 可见,在不同负载条件下,优化叶片比初始叶片功率输出均有明显提高;同时风力机启动风速由 3.84 m/s 降低到 3.03 m/s,表明优化叶片具有更好的启动性能。在 12 V 定电压模式下,风速为 3.84 m/s 时,优化叶片比初始叶片功率提高了 61.93%;风速为 7.63 m/s 时,功率提高了 4.44%。在 9 V 定电压模式下,风速为 4.86 m/s 时优化叶片比初始叶片功率提高了 8.03%;风速为 8.56 m/s 时功率提高了 16.79%。在 8 V 定电压模式下,功率最大提高了 55.72%。

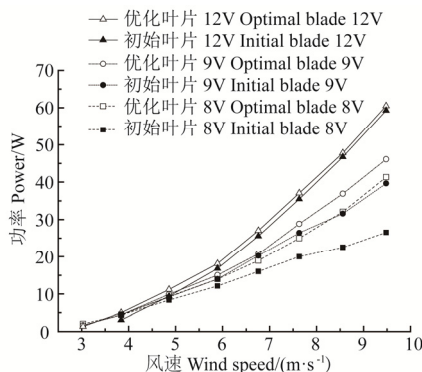


图 8 相同负载功率曲线对比

Fig.8 Comparison of power curves with same electrical loads

6 结论

以 100 W 水平轴风力机为研究对象,通过理论优化设计与性能测试相结合的方式开展了低风速水平轴风力机气动性能研究,主要结论如下:

1) 考虑电机参数匹配和变风况条件,基于修正叶素动量理论研究了设计叶尖速比和设计攻角对风轮变风况气动性能影响规律。结果表明,设计叶尖速比增加,低叶尖速比区域风能利用系数降低,而高叶尖速比区域风能利用系数明显提高;设计攻角增大,低叶尖速比区域风能利用系数降低;而高叶尖速比区域风能利用系数稍有提升。

2) 基于低风速地区风资源特点,以提高年发电量和降低启动风速为目标,以设计叶尖速比、设计攻角、以及叶片弦长和扭角为变量,采用多目标遗传算法进行全局气动寻优,在当前参数下该小型水平轴风力机优化后年发电量提高了 9.14%,风轮启动转矩提高了 9.62%。

3) 搭建风力机气动性能试验平台,获得风力机功率输出特性。在不同负载条件下,优化叶片比初始叶片功率输出均有明显提高;同时风力机启动风速由 3.84 m/s 降低到 3.03 m/s,表明优化叶片具有更好的气动性能,验证了优化设计方法的可行性。

提出一种将整机设计参数和叶片几何外形参数优化相结合的风力机多目标优化设计策略,综合考虑风力机多层次全局优化,避免了常规方法易陷入局部优化的局限性,提供了一种低启动风速与高功率输出之间矛盾的解决方案,为低风速适用型水平轴风力机设计与应用提供重要参考。

[参考文献]

- [1] 陈进,王旭东,沈文忠,等. 风力机叶片的形状优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 131—134.
Chen Jin, Wang Xudong, Shen Wenzhong, et al. Optimization design of blade shapes for wind turbines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 131—134. (in Chinese with English abstract).
- [2] 汪泉,陈进,王君,等. 基于连续攻角的风力机翼型整体气动性能提高的优化设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 143—149.
Wang Quan, Chen Jin, Wang Jun, et al. Wind turbine airfoil optimal design with high whole aerodynamic performance considering continuous angle of attack[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 143—149. (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘雄,陈严,叶枝全. 遗传算法在风力机风轮叶片优化设计中的应用[J]. 太阳能学报, 2006(2): 180—185.
Liu Xiong, Chen Yan, Ye Zhiquan. Application of genetic algorithms to hawt rotor blades optimization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006(2): 180—185. (in Chinese with English abstract).
- [4] 章嘉麟,周正贵,雷延生. 基于并行遗传算法的低风速高性能风力机叶片优化设计[J]. 太阳能学报, 2011(8): 1275—1280.
Zhang Jialin, Zhou Zhenggui, Lei Yansheng. Optimization for high performance wind turbine blades at low wind velocity based on parallel genetic algorithms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011(8): 1275—1280. (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴江海,王同光,赵新华. 风力机叶片优化设计目标[J]. 南京航空航天大学学报, 2011(5): 661—666.
Wu Jianghai, Wang Tongguang, Zhao Xinhua. Design targets for wind turbine blade optimization[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011(5): 661—666. (in Chinese with English abstract).
- [6] Wang Tongguang, Wang Long, Zhong Wei, et al. Large scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis [J]. Fluid Mechanics, 2012, 57(5): 466—472.
- [7] 杨阳,李春,缪维跑,等. 基于多目标遗传算法的风力机叶片全局优化设计[J]. 机械工程学报, 2015(14): 192—198.
Yang Yang, Li Chun, Miao Weipao, et al. Global optimal design of wind turbines blade based on multi-object genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015(14): 192—198. (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨阳,李春,叶舟,等. 风力机叶片多目标遗传算法优化设计[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 1011—1014.
Yang Yang, Li Chun, Ye Zhou, et al. Optimal design of horizontal-axis wind turbines blade based on multi-object genetic algorithm[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 1011—1014. (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨阳,李春,缪维跑,等. 水平轴风力机叶片优化设计方法[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1107—1113.
Yang Yang, Li Chun, Miao Weipao, et al. Optimum design method horizontal-axis wind turbine blade[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1107—1113. (in Chinese with English abstract).
- [10] 王骥月,丛茜,梁宁,等. 基于海鸥翼型的小型风力机叶片仿生设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 72—77.
Wang Jiyue, Cong Qian, Liang Ning, et al. Bionic design and test of small-sized wind turbine blade based on seagull airfoil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 72—77. (in Chinese with English abstract).
- [11] 程琰,张水明,权龙. 基于约束主导混合粒子群算法的风力机叶片优化方法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 176—181.
Cheng Hang, Zhang Shuiming, Quan Long. Optimization method for wind turbine blade based on dominated constraint hybrid particle swarm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 176—181. (in Chinese with English abstract).
- [12] 戴巨川,赵尚红,尹喜云,等. 大型风力机叶片气动外形及其运行特性设计优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 138—145.
Dai Juchuan, Zhao Shanghong, Yin Xiyun, et al. Design and optimization of aerodynamic shape and operating characteristics of large scale wind turbine blade[J]. Chinese

- Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17):138—145. (in Chinese with English abstract).
- [13] 郑玉巧, 赵荣珍, 刘宏. 大型风力机叶片气动与结构耦合优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1812—1817. Zheng Yuqiao, Zhao Rongzhen, Liu Hong. Research of aerodynamic and structural coupling optimization design for blade of large-scale wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(8):1812—1817. (in Chinese with English abstract).
- [14] Eke G B, Onyewudiala J I. Optimization of wind turbine blades using genetic algorithm[J]. Global Journal of Researches in Engineering, 2010, 7(10):22—26.
- [15] Polat O, Tuncer I H. Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a parallel genetic algorithm[J]. Procedia Engineering, 2013, 61:28—31.
- [16] Ebert P R, Wood D H. Observations of the starting behaviour of a small horizontal-axis wind turbine[J]. Renewable Energy, 1997, 12 (3) : 245—257.
- [17] Wright A K, Wood D H. The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine[J] Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(14/15):1265—79.
- [18] Wang Lin, Tang Xinzi, Liu Xiongwei. Blade design optimisation for fixed-pitch fixed-speed wind turbines[J]. International Scholarly Research Network, ISRN Renewable Energy, 2012(9):1—8.
- [19] Bavanish B, Thyagarajan K. Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 26:169—182.
- [20] Hendriana D, Firmansyah T, Setiawan J D, et al. Design and optimization of low speed horizontal-axis wind turbine using OpenFOAM[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015, 10: 10264—10274.
- [21] Zhu J, Cai X, Gu R. Multi-objective aerodynamic and structural optimization of horizontal-axis wind turbine blades[J]. Energies, 2017, 10(1):1—18.
- [22] Hu W, Park D, Choi D H. Structural optimization procedure of a composite wind turbine blade for reducing both material cost and blade weight[J]. Engineering Optimization, 2013, 45(12):1469—1487.
- [23] Bottasso C L, Campagnolo F, Croce A. Multi-disciplinary constrained optimization of wind turbines[J]. Multibody System Dynamics, 2012, 27(1):21—53.
- [24] Fischer G R, Kipourous T, Savill A M. Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables[J]. Renewable Energy, 2014, 62:506—515.
- [25] Manwell J F, Mccowan J G, Rogers A L. Wind energy explained: Theory, design and application, second edition[J]. Wind Engineering, 2009, 30(2):169—170.
- [26] Wood D H. A blade element estimation of the cut-in wind speed of a small turbine[J]. Wind Engineering, 2001, 25(2): 125—130.

Aerodynamic optimization and experiment of horizontal axis wind turbine for low wind speed

Tang Xinzi, Sun Songfeng, Li Pengcheng, Lu Xinyu, Peng Ruitao

(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The low wind speed area (below 6 m/s) in China is more than 85% of the total land area. For areas with poor wind resource and urgent supply demand for electricity, the wind turbine for low wind speed area is an effective complement of the centralized power generation, which has received wide attention both at home and abroad. Research on the aerodynamic performance of low speed wind turbines is of great significance for promoting the development of small-scale wind turbine technology to achieve a decentralized new energy strategy. To develop a horizontal axis wind turbine suitable for low wind speed region, taking a 100 W small horizontal axis wind turbine as the research object, the development of a horizontal axis wind turbine for low wind speed was investigated by theoretical and experimental approaches in this paper. Firstly, a small-scale wind turbine design and analysis system was established based on the modified blade element momentum (BEM) theory and validated with experiments. Secondly, considering the matching of generator parameters, the influences of designed tip speed ratios and designed attack angles on the aerodynamic performances of the wind turbine were analyzed. Thirdly, based on the local wind resource statistic characteristics, taking the designed tip speed ratio, the designed attack angle, the chord length and twist angle as designed variables, the global multi-objective aerodynamic optimization of a small wind turbine blade for both improving annual energy production and starting performance was executed using NSGA-II. The aerodynamic performances of the wind turbines before and after optimization were compared based on the modified BEM theory. Finally, a laboratory wind turbine performance test platform was built to carry out the aerodynamic performance experiment, and the wind turbine power outputs at different wind speeds before and after optimization were measured. Based on the above research, the main results are as follows: The designed tip speed ratio and angle of attack have significant effects on the performances of wind turbine. With the increase of the designed tip speed ratio, the power coefficient at low tip speed ratio decreases and the maximum reduction is about 58.17%; With the increase of the designed attack angle, the power coefficient at low tip speed ratio decreases and the maximum reduction is about 65.14%. The performance at high tip speed ratio obviously improves and the power coefficient is increased by 234.39% at the maximum. After the multi-objective aerodynamic optimization, the annual energy production is increased by 9.14% and the starting torque of the wind turbine is increased by 9.62%. Experimental results show that, the optimal blades have significantly higher power output than the initial blades under different electrical load conditions; The starting wind speed of the wind turbine is reduced from 3.84 m/s to 3.03 m/s. The feasibility of the optimal designed method was verified. Therefore, it can be concluded that, the multi-objective global optimization strategy of wind turbine blade put forward in this paper, combining the overall design parameters with the geometric parameters, avoids local optimization, presents a solution to the contradiction between low starting wind speed and high power output. This research provides references for the design and application of horizontal axis wind turbines for low wind speed areas.

Keywords: wind turbines; electric power generation; optimization; low wind speed; starting performance; multi-objective optimization.