

基于叶尖损失的风力机叶片气动性能数值模拟

王旭东¹, 王立存¹, 蒋仁科², 陈彬¹

(1. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067;

2. 广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘 要: 针对叶尖损失对风力机载荷和输出功率的影响, 对比分析了 Glarent 叶尖损失修正模型及 Shen 叶尖损失修正模型。以传统动量叶素理论为基础, 基于改进的 Shen 叶尖损失修正模型提出了风轮空气动力学修正计算模型。借助此模型, 对某小功率实验风轮的轴向和周向诱导因子以及输出功率进行了数值模拟, 通过对实验风轮的测试数据进行整理分析, 分别将风速 10 与 15 m/s 条件下提出模型的计算结果和实验数据进行了比较, 验证了提出模型的可靠性。研究结果对风力机叶片载荷及疲劳特性的深入研究具有指导意义, 同时为提高风力机输出功率, 降低风电成本奠定了理论基础。

关 键 词: 风力机风轮; 叶尖损失; 诱导因子; 气动载荷; 实验比较

中图分类号: TK83 文献标识码: B

引 言

当风吹过风轮的时候, 动能发生转移, 风速会下降, 但是不足以产生较大的加速度和作用力, 因此, 风力机是借助压力的突变来实现动能的吸收。风力机的存在导致上游剖面接近风轮的空气逐渐减速以至于当空气到达风轮圆盘时其速度已经低于来流风速。风速的降低导致了来流场中流管膨胀, 由于其速度没有对气体或通过气体来做功, 所以气体的静压将上升以吸收其动能的减少。因此, 风力机空气动力学上应用动量理论来解决风轮吸收动能的多少^[1~2]。

为了能够准确的研究风力机吸收风能的多少及风轮效率, 在以传统动量叶素理论研究风轮空气动力学时, 需要考虑风轮叶尖损失因子的影响。针对螺旋桨机翼, Glarent 较早提出了叶尖损失修正模型^[3]。后来结合实验结果也有不断的修正模型提出, 最近 Shen 在综合现有的各种叶尖修正模型后, 提出的风轮叶尖修正模型^[4]。本研究在对比现有

的叶尖损失修正模型的基础上, 通过建立基于叶尖损失的风轮空气动力学模型, 以理论计算和实验对比的方法研究了风力机叶片的空气动力学特性。

1 基于叶尖损失的风轮空气动力学模型的建立

应用一维动量理论对风轮进行空气动力学特性分析时, 将风轮考虑成了一个由无限叶片组成的桨盘, 而实际中风轮都是由有限个叶片来组成的, 基于这个原因, 在进行风轮功率计算时, Prandtl 提出了叶尖损失修正因子^[5], 即:

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \times \frac{R-r}{r \sin \varphi} \right) \right] \quad (1)$$

式中: F —普朗特叶尖损失修正因子; B —叶片个数; R —风轮半径; r —叶片径向位置; φ —入流角。

以动量—叶素理论为基础, Glarent 首先对风轮的轴向和周向因子进行了修正, 最终的风轮轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 表达为^[3]:

$$a = \frac{1}{4F \sin^2 \varphi / (\sigma C_n) + 1} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{4F \sin \varphi \cos \varphi / (\sigma C_t) - 1} \quad (3)$$

式中: C_n —叶片翼型面上的法向力系数; C_t —叶片翼型面上的切向力系数; $\sigma = Bc / (2\pi r)$, c —叶片翼型弦长。

在叶尖处风的入流角一般不为零, 那么在应用叶素理论计算风轮推力和功率的时候, 叶尖处的力和载荷也不为零。但是, 由于在叶尖处, 气流是从叶片的压力面向吸力面转移, 导致叶尖处实际上的载荷是趋于零的。

因此, Shen 对风轮叶素理论中翼型的法向力和

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2012-03-28

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2011jjA70002)

作者简介: 王旭东 (1981-), 男, 陕西蓝田人, 重庆工商大学讲师、博士。

切向力系数 (C_n, C_t) 做了进一步的修正^[4]:

$$\begin{cases} C_{n\text{修正}} = F_1 C_n \\ C_{t\text{修正}} = F_1 C_t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_1 = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} [\exp(-g \frac{B(R-r)}{2r \sin \varphi})]$;
 $g = \exp[-0.125(B\lambda - 21)] + 0.1$; $\lambda = \Omega R / V_0$,
 为叶尖速比。

此时轴向和周向诱导因子修正为:

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

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

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

在对其进行数值模拟求解时,首先假设轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 的初值,一般取零。根据此初值,计算入流角为:

$$\varphi = \arctan \frac{(1-a) V_0}{(1+b) \Omega r} \quad (7)$$

式中: V_0 —来流风速; Ω —风轮转动角速度。

进而计算出攻角 α 为:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (8)$$

式中: θ —桨角。

根据所选翼型的空气动力学特征曲线,可以得到叶素在该攻角处的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d , 以此求得叶素的法向力系数 C_n 和切向力系数 C_t :

$$\begin{cases} C_n = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \\ C_t = C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi \end{cases} \quad (9)$$

将所得的 C_n, C_t, F, F_1 以及入流角 φ 重新带入式(5)和(6)计算,并得到轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 的新值。

比较新计算的 a 和 b 与上一次的 a 和 b , 如果误差小于设定的误差值,则迭代完成,否则继续迭代,本研究中迭代误差取值为 0.001。

对于叶片翼型面代入数值模拟的轴向和周向诱导因子,输出功率为:

$$dP = 4\pi\rho\Omega^2 V_0 b(1-a)r^3 dr \quad (10)$$

式中: ρ —空气密度。

将其在叶片展向积分,可得整个风轮输出功率为:

$$P = 4\pi\rho\Omega^2 V_0 \int_0^R b(1-a)r^3 dr \quad (11)$$

2 风轮气动性能数值模拟与实验比较

基于上节所建立的风轮空气动力学理论模型,

借助 MATLAB 软件编制程序进行计算数值模拟^[6-7]。选取欧盟资助项目 MEXICO (Model experiments in controlled conditions) 的风轮进行了空气动力学特性分析。该实验风轮直径 4.5 m, 叶片的工作桨角为 0.7° , 塔架高为 6.5 m。该风轮叶片沿展向依次采用了不同的 3 种翼型来组成,具体分布为: 叶片的展向 20% 到 45% 处为 DU 91-W2-250 翼型; 叶片的展向 55% 到 65% 处为 RISØ-A21 翼型; 叶片的展向 70% 到 100% 处为 NACA 64418 翼型。图 1 和图 2 分别为该风轮轴向和周向诱导因子沿展向随风轮半径变化情况的数值模拟。图 3 为该实验风轮在风速 15m/s 下的输出功率随时间变化关系。图 4 为模拟的风轮输出功率随风速变化图。

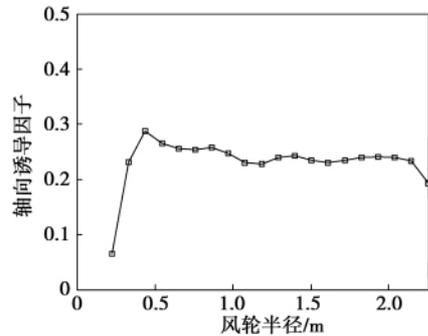


图 1 风轮的轴向诱导因子

Fig. 1 Axial induction factor of the wind wheel

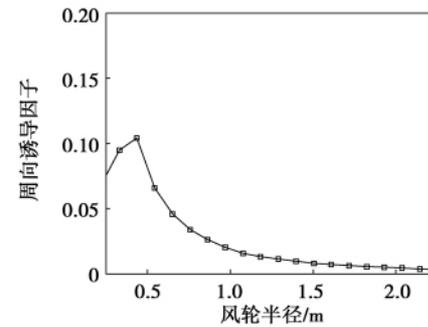


图 2 风轮周向的诱导因子

Fig. 2 Circumferential induction factor of the wind wheel

为了更好地验证建立的风力机风轮空气动力学模型,这里同样应用欧盟资助项目 MEXICO 实验风轮的实验数据和模型理论计算结果进行了比较分析。

在 MEXICO 实验中,实验风洞截面面积为 $9.5 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$ 。为了模拟实际的风力机工作条件,使得气流拥有较大的雷诺数,同时马赫数又要小于

0.3 ,实验中控制风轮的叶尖速度为 100 m/s ,相应的风轮转速为 424.5 r/min。当风洞来流在 15 m/s 时 ,风轮达到设计叶尖速比 6.7 ,具体模型如图 5 所示^[8]。

验较为吻合。

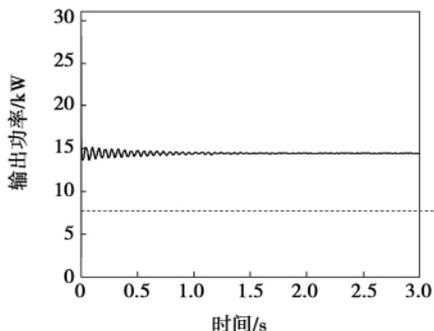


图3 风速 15 m/s 时风轮的输出功率

Fig.3 Output power of the wind wheel at a wind speed of 15 m/s

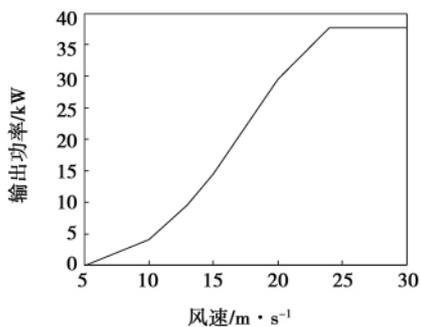


图4 风轮输出功率特性

Fig.4 Power output characteristics of the wind wheel

在实验过程中 ,测试了叶片沿展向 25%、35%、60%、82% 以及 95% 处的压力分布。根据测得的压力分布 ,通过积分计算分别可以得到垂直和平行于翼型弦长的作用力系数 C'_n 以及 C'_t 。那么叶片叶素的法向力系数 C_n 和切向力系数 C_t 就可以计算到:

$$\begin{cases} C_n = C'_n \cos\theta' - C'_t \sin\theta' \\ C_t = C'_n \sin\theta' + C'_t \cos\theta' \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\theta' = \theta + \theta_{pitch}$ 为叶片扭角和桨角之和。

通过测试计算得到了作用力系数 ,应用叶素理论来计算风轮叶片的法向和切向力分布。图 6 是风速 10 m/s ,叶尖速比为 6.7 ,桨角为 $\theta_{pitch} = 0.7^\circ$ 时测试的作用在叶片的法向力与切向力同理论数值模拟结果的比较。图 7 是风速 15 m/s ,其它条件相同的比较结果。由图 6 和图 7 可以看出 ,理论结果和实



图5 风轮实验模型

Fig.5 Model for the wind wheel under the test

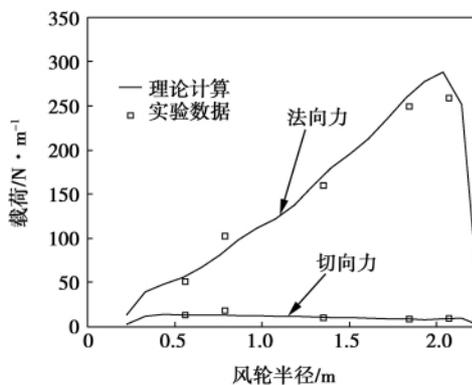


图6 风速 10 m/s 时叶片法向力和切向力的结果比较

Fig.6 Comparison of the results of the normal forces and tangential forces of the blade at a wind speed of 10 m/s

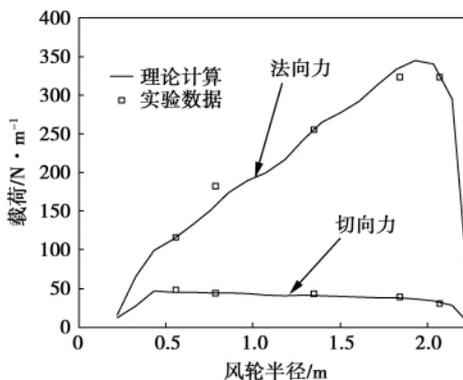


图7 风速 15 m/s 时叶片法向力和切向力的结果比较

Fig.7 Comparison of the results of the normal forces and tangential forces of the blade at a wind speed of 15 m/s

3 结 论

(1) 基于传动的风力机的一维动量叶素理论,对风力机风轮叶尖损失因子的修正模型进行了对比分析,建立了新的风力机风轮空气动力学模型。

(2) 应用建立的风轮空气动力学模型,以某实验风轮为对象,理论计算了该模型的轴向及周向诱导因子,并对风速 10 m/s 与 15 m/s 条件下风轮叶片的法向和切向载荷进行了理论计算和实验比较,验证了模型的可靠性,为后续风力机叶片的多学科协同优化设计奠定了理论基础。

感谢丹麦技术大学提供的欧盟资助项目 MEXICO 风轮实验数据。

参考文献:

- [1] 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.
HE De-xin. Wind engineering and industrial aerodynamics [M].

- Beijing: National Defence Industry Press 2006.
- [2] Ozgur Turhan ,Gokhan Bulut. On nonlinear vibrations of a rotating beam[J]. Journal of Sound and Vibration 2009 322: 314 - 335.
- [3] Glauert H. Airplane propellers ,in aerodynamic theory [M]. New York Dover Publications ,1963.
- [4] Shen W Z ,Mikkelsen R ,Sørensen J N et al. Tip loss correction for wind turbines computations [J]. Wind Energy 2005 8: 457 - 475.
- [5] Hansen M O L. Aerodynamics of wind turbines [M]. London: James & James(Science Publishers) Ltd 2000.
- [6] 王旭东 陈 进 王立存 等. 旋转风力机叶片气动弹性偏移变形的数值模拟研究[J]. 中国机械工程 2011 22(7) : 790 - 793.
WANG Xu-dong ,CHEN Jin ,WANG Li-cun et al. Numerical simulation study of the aerodynamic elastic deviation deformation of the rotating wind turbine blade [J]. China Mechanical Engineering , 2011 22(7) : 790 - 793.
- [7] 苏金明 阮沈勇. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社 2008.
SU Jin-ming ,YUAN Shen-yong. MATLAB practical course [M]. Beijing: Electronic Industry Press 2008.
- [8] Schepers J G ,Snel H. Model experiment in controlled conditions [R]. ECN Final Report ECN-E-07-042 ,Petten: Energy Research Center of the Netherlands 2007.

(辉 编辑)

《储能科学与技术》征订启事

《储能科学与技术》(Energy Storage Science and Technology) (双月刊) 是新闻出版总署于 2012 年 4 月正式批准的储能领域唯一的科学技术类专业刊物,国内统一刊号 CN 10 - 1076 /TK,国际标准刊号 ISSN 2095 - 4239,由中国石油和化学工业联合会主管,化学工业出版社主办。

办刊宗旨: 依靠强大的专家编委队伍,立足储能行业,报道储能科学基础与应用研究、产业动态和发展趋势,交流推广储能新理论、新技术、新成果,服务科研和生产实践,引导我国储能行业健康发展,进而提升我国储能科技在国际上的显示度。

主要栏目: “特约评述”、“研究及进展”、“应用技术”、“产经动态”、“示范项目”等。

读者对象: 《储能科学与技术》既具有学术性和前瞻性,又注重实用性和导向性,主要面向储能行业从事科研、设计、制造、管理与营销的专业技术人员,相关专业的大中专院校师生,储能产品用户,以及与储能领域相关的设备、材料、信息、能源、环境、投资等行业科研及生产管理人员。

《储能科学与技术》现为双月刊,单月 1 日出版,标准大 16 开,国内外公开发行,国内定价 28 元/期,168 元/年,国外定价 16 美元/期,96 美元/年(均含邮资)。

订阅方式

1. 银行汇款

开户银行: 中国工商银行北京和平里支行 账户名称: 北京进展期刊社

账 号: 0200004219200176319

2. 邮局汇款

收款地址: 北京市东城区青年湖南街 13 号

收 款 人: 《储能科学与技术》编辑部 邮 编: 100011

联系方式

电 话: 010 - 64519601 / 64519602 传 真: 010 - 64519602

E - mail: energystorage_cip@ 163. com 联系人: 王婧

calculation method in question is effective and reliable. The test results show that the model pump can meet the design requirements keeping a relatively high efficiency and a relatively wide high efficiency zone at the same time of realizing an operation without any overload. The test results can offer useful reference for further studying the hydrodynamic performance of a non-overload vortex pump and optimizing the design methods. **Key words:** vortex pump, non-overload, orthogonal design, numerical simulation

烧结矿显热分级回收实验研究 = Experimental Study of the Apparent Heat Staged Recovery of a Sinter Mine [刊, 汉] / ZHAO Bin, WEN Zhi-hai, ZHONG Xiao-hui, HAN Xi-qiang (Hebei Provincial Key Laboratory on Modern Metallurgical Technology, Hebei United University, Tangshan, China, Post Code: 063009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 596 ~ 599

Based on the waste heat energy stepped utilization theory, set up was a test stand for recovering in stages the apparent heat of a sinter mine. Under the condition that the initial temperature of a sinter mine is identical, the exergy and heat recovery rates of the nine groups of orthogonal test operating conditions were compared. The test results show that under the operating condition of which the particle diameter is 10 - 16 mm, the material layer thickness is 1 200 mm, the cooling air quantity is 748 m³/h and the air temperature at the inlet is 70 °C, both exergy and heat recovery rate are relatively high, reaching 49.0% and 88.1% respectively. The average heat recovery rate of a power and absorption type heat pump-based staged recovery system hits 84.6% and the average exergy recovery rate reaches 47.6%, averagely 10.7 percentage points higher than the heat recovery rate of a single stage power recovery system and averagely 2.3 percentage points higher than the exergy recovery rate of the single stage power recovery system. **Key words:** sintering and cooling machine, medium and low temperature waste heat, absorption type heat pump, staged recovery, orthogonal test

基于叶尖损失的风力机叶片气动性能数值模拟 = Numerical Simulation of the Aerodynamic Performance of the Blades of a Wind Turbine Based on the Blade-tip Losses [刊, 汉] / WANG Xu-dong, WANG Li-cun, CHEN Bin (Education Ministry Engineering Research Centre for Waste Oil Resource Technology and Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, China, Post Code: 400067), JIANG Ren-ke (Guangxi Liugong Machinery Co. Ltd., Liuzhou, China, Post Code: 545007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 600 ~ 603

In the light of the influence of the blade tip losses on the load and output power of a wind turbine, contrasted and

analyzed were Glarent and Shen blade tip loss correction model. With the traditional momentum blade element theory serving as the basis and based on the improved Shen blade tip loss correction model, the authors presented an aerodynamic correction calculation model for wind wheels. With the help of the model in question, a numerical simulation were performed of the axial and circumferential induction factors and output power of a small power test wind turbine. Through processing and analyzing the test data of the test wind wheel, the calculation results and test data of the model under discussion were compared at the wind speed of 10 m/s and 15 m/s respectively, verifying the reliability of the model. The research results can offer guidance for an in-depth study of the load and fatigue characteristics of the blades of a wind turbine and in the meantime, can lay a theoretical basis for enhancing the output power of a wind turbine and lower the cost of the wind power. **Key words:** wind turbine wheel, blade tip loss, induction factor, aerodynamic load, test comparison

核电站离心式上充泵转子系统临界转速计算分析 = Calculation and Analysis of the Critical Rotating Speed of the Rotor System of a Centrifugal Charging Pump in a Nuclear Power Plant [刊, 汉] FU Qiang, YUAN Shou-qi, ZHU Rong-sheng (Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27 (5). - 604 ~ 609

By using the finite element software ANSYS, established was the three-dimensional model for the rotor component of a centrifugal charging pump with its finite element mesh being divided. The inherent modal analysis, two support and three support modal analysis and critical rotating speed calculation of the rotor component were conducted in the dry and wet state respectively. The modal analytic results show that the dry state base frequency is 228.37 Hz while the wet state base frequency is 253.40 Hz, 10.96% higher than the former. When two supports are adopted, the base frequency is 72.63 Hz, 71.33% lower than that when three supports are adopted. The calculation result of the critical rotating speed is 13702.5 r/min, 204.48% higher than the actual rated speed of the charging pump, which is 4 500 r/min, indicating that the critical speed can meet the requirements. **Key words:** nuclear power plant, charging pump, rotor system, critical rotating speed, finite element

气温和空气湿度对桨叶覆冰特性影响的实验研究 = Experimental Study of the Influence of Air Temperature and Humidity on the Ice Covering Characteristics of a Blade [刊, 汉] LI Lu-ping, LIU Sheng-xian, TAN Hai-hui, LU Xu-xiang (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27