

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.021

基于叶素理论及CFD的中扬程风力提水机的 低实度高效风轮设计

高翀恒^a, 郑源^b, 程相^a, 李中杰^a

(河海大学 a. 水利水电学院; b. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 为了降低风力提水机的起动风速, 解决传统风力提水机多叶片大实度、风能利用系数低的缺点, 采用叶素理论对风力提水机叶片的气动外形进行设计, 引入了修正因子, 并根据工程实际优化了叶片的弦长以及安装角; 采用CFD方法对风轮进行数值模拟, 通过分析证明所设计的风力提水机能在2.5 m/s的微风下起动, 在额定工况下风能利用系数高达0.46, 叶片具有很好的三维流动特性, 气流流动稳定无脱流, 具有中扬程、低实度、低风速起动进行提水作业的优点, 扩大了风能的利用范围。

关键词: 风力提水; 风轮叶片; 低实度; 风能利用系数; CFD

中图分类号: TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0497-05

Design of the efficient rotor with low compaction for middle head wind-driven water pump based on blade element theory and CFD

GAO Chong heng^a, ZHENG Yuan^b, CHENG Xiang^a, LI Zhong jie^a

(a. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; b. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reduce the threshold wind velocity of wind driven water pump and improve the disadvantages of multiple blade, large compaction, and low wind power coefficient in the traditional wind driven water pump, the blade element theory was used to design the aerodynamic shape of blades in the wind driven water pump. The correction factor was introduced, and the chord length and setting angle of the blade were optimized. The CFD method was used to perform numerical simulation of the water pump. The results showed that the designed wind driven water pump can start at a rate of 2.5 m/s under the breeze condition, and the wind power coefficient can reach 0.46. The blade has great three dimensional flowing characteristics and the air is stable without flow separations under certain condition. The designed wind driven water pump advantages of middle head, low compaction, and low starting wind speed, which can expand the scope of wind energy utilization.

Key words: wind driven water pumping; rotor blades; low compaction; wind power coefficient; CFD

供电不便的山区或者农牧地带常利用风力直接带动水泵提水灌溉, 这种提水方式无需发电装置, 结构简单、成本低廉, 在世界范围内都获得了广泛的应用^[1-6]。目前应用较广的风力提水机多为大实度风轮, 虽然其输出转矩大, 但是叶片数的增加必然导致成本增加。一些研究者对此类风力提水机做了相关的实验研究^[7-10], 结果表明风轮风能利用系数一般在0.35左右, 风能利用率较低。

史久瑞等^[11]对多叶式风轮采用控制变量法进行大量的实验, 实验表明叶片翼型的形状, 叶片长度以及安装角等参

数对风轮的气动性能皆有影响, 提出了风机与水泵的匹配问题; 李海涛等^[12]对FTJ-481068型风力提水系统进行了机械结构方面的改进, 降低了起动风速; 胡建栋等^[13]在FSH 400提水机中加入了流线型的叶片, 提高了风能利用率。然而这些研究依然以大实度风轮为主, 对提水叶片的设计并无创新。鉴于国内对低实度风力提水机的研究尚少, 因此研究一种具有低实度、高气动性能以及低起动风速的风力提水机有着重要的意义。

本文采用叶素理论对风轮进行多目标优化设计, 考虑了

收稿日期: 2014-11-25 修回日期: 2014-12-25 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1557.025.html>

作者简介: 高翀恒(1991-), 女, 福建福州人, 主要从事水利水电工程及新能源方面的研究。E-mail: 1035772135@qq.com

通讯作者: 郑源(1964-), 男, 山东日照人, 教授, 博士生导师, 主要从事水利水电工程及流体机械方面的研究。E-mail: zhengyuan@hhu.edu.cn

叶尖以及轮毂的损失,优化了叶片的弦长以及安装角,进行数值模拟且与实验结果对比验证,对小型风力提水机的改进设计有着指导和借鉴意义。

1 风轮的设计

1.1 风轮基本参数的确定

在进行风力机风轮的设计前,首先要确定风力机的各个参数,包括:额定风速、机组扬程、设计叶尖速比、叶片长度、叶片数、风能利用系数、风轮功率和额定转速。

额定风速应该按照当地的风能资源评估报告确定。本风力提水机应用于山东日照某地农田灌溉,当地风速以微风居多,年平均风速为 3~5 m/s,为了保证该提水机能够在低风速下进行作业,将额定风速取为 3 m/s;根据当地地形以及灌溉要求,提水机的扬程设计为 10 m。

叶尖速比是叶尖的线速度与来流风速的比值,是风轮设计中非常重要的参数,它要根据风力机的种类、叶尖的形状来确定的。对于提水用的风力机,大多为低转速大扭矩,叶尖速比应在 1~3 之间^[14],经过多次尝试,确定叶尖速比为 2.4 时提水机能够获得较好的出力。

考虑到成本因素,风轮直径以及叶片数的确定原则是:在保证风轮的扭矩满足设计扬程 10 m、起动风速 2.5 m/s 的情况下,尽可能地减小叶片长度以及风轮的实度。基于这个原则,确定风轮直径为 3.5 m。叶片的数量是根据叶尖速比来确定的,当叶尖速比为 1~3 时,叶片数范围为 4~20^[15],同时为了保证提水所需要的起动力矩,叶片数量不能太少,故参考与本文设计扬程相同的 FT-2.5 型传统风力提水机^[16],将叶片数定为 FT-2.5 型机风轮叶片数量的 1/4,即 6 片,同时六叶片的均匀分布使得风轮的旋转效应对塔架的震动以及载荷较小,输出功率较稳定。

为了获得较高的风能利用系数,设计风轮的风能利用系数 C_p 为 0.46。

综上,可以根据计算公式算出风力提水机风轮的输出功率如下:

$$P = \frac{1}{8} \rho U^3 \pi D^2 C_p \eta \quad (1)$$

式中: P 为风力机输出功率(W); ρ 为空气密度,一般取 1.225 kg/m³; U 为额定风速(m/s); D 为风轮直径(m),本文取为 3.5 m; η 为传动效率,一般取 95%。根据式(1)确定风轮的输出功率为 75 W。

风力机的风轮额定转速由公式(2)确定:

$$N = \frac{60 \lambda_0 U}{\pi D} \quad (2)$$

式中: N 为风轮转速(r/min); λ_0 为风轮设计尖速比,本文取 $\lambda_0 = 2.4$ 。根据式(2)计算确定风力提水机风轮的额定转速为 40 r/min。

1.2 叶片翼型的选择

叶片翼型选取的好坏将直接影响到其捕获风能的能力,所选定翼型的升阻比越大,风力机对风能的捕获能力就越好, C_p 也就越大。风力机叶片在距离叶尖 75% 展长的剖面是功率的主要产生区域,在这个区域翼型的选择应具有如下特点:较高的升阻比;足够的相对厚度以承受叶片旋转时产

生的载荷;对叶片表面粗糙度的敏感程度不高^[17]。鉴于该翼型是用于低风速起动的风力提水机,本文选择综合性能较好的 NACA 4412 作为叶片的翼型进行进一步设计。

1.3 叶片的外形设计

1.3.1 建立数学模型

叶素理论的思想是将叶片沿展向分成许多相互独立的、微小的微段,对每个微段分析其气动参数,然后用积分的方法求得整个叶片参数。本文在叶片设计过程中综合考虑了风轮旋转时的叶尖损失以及轮毂损失,引入周向、轴向诱导因子及普朗特修正因子,通过 Matlab 程序语言进行迭代求解。为了保证叶片的每个叶素都能在最佳攻角的状态下工作,叶片必须设计成扭曲型以获得较高的风能利用率。本文以 C_p 及风轮输出扭矩 M 为优化目标,以叶尖损失因子为约束条件,进行多目标优化计算,求得叶片每个截面的弦长以及安装角,并进行线性优化以符合实际加工的需求。叶片设计的目标函数为

$$\text{Max} \frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{8}{\lambda^5} b(1-a)F\lambda^3 \quad (3)$$

$$\text{Max} M = \int_0^R \frac{dM}{dr} dr = \frac{1}{2} \rho U^3 \cdot \pi R^2 \cdot \frac{4(1-a)^2}{(1+b)} \quad (4)$$

式中: M 为输出力矩(N·m); a 为轴向诱导因子; b 为周向诱导因子; F 为普朗特修正因子; λ 为沿展向不同半径处的尖速比。

$$\text{约束条件为: } a(1-aF) = b(1+b) \lambda^2; F_i = \frac{2}{\pi}$$

$$\arcsin(\exp(-f_1)); F_h = \frac{2}{\pi} \arcsin(\exp(-f_2)); f_1 = \frac{B}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi};$$

$$f_2 = \frac{B}{2} \frac{r-r_{mb}}{r_{mb} \sin \phi}; F = F_i \cdot F_h; \phi = \arctan\left(\frac{1}{\lambda} \frac{1-a}{1+b}\right);$$

式中: B 为叶片数,本文取为 6; R 为风轮半径(m); f_1 为叶尖损失因子; f_2 为轮毂损失因子; r_{mb} 为轮毂半径,本文取为 0.15 m; ϕ 为入流角(°); r 表示从建模原点到叶片每个截面的距离(m)。

1.3.2 计算结果

将叶片分为 19 个截面, i 为 r 与 R 的比值,它反映了叶素所在的位置,范围为 0~1。经过迭代求解,得到诱导因子以及普朗特因子的值见图 1。

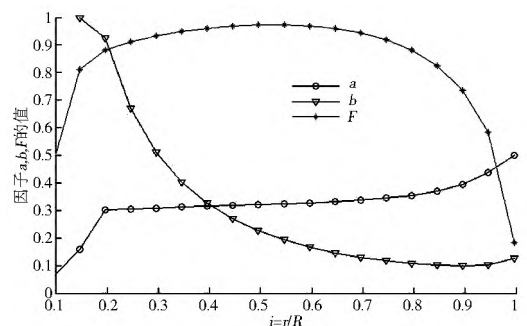


图 1 诱导因子以及普朗特修正因子变化曲线

Fig. 1 Variation curves of inducible factor and Prandtl correction factor

将求得的诱导因子以及入流角带入式(5)和式(6)得

$$\frac{B C C_l}{r} = \frac{8 \pi \sin^2 \phi}{\cos \phi} \frac{(1-aF) a F}{(1-a)^2} \quad (5)$$

$$\theta = \phi - \alpha \quad (6)$$

式中: C 为弦长(m); C_l 为升力系数; θ 为安装角(°); ϕ 为入流

角($^{\circ}$); α 为最佳攻角($^{\circ}$), 在额定风速下取为 8° 。最后求得叶片各个截面的弦长 C 和安装角 θ , 并根据实际加工情况对其进行修正, 结果见图 2 和图 3。

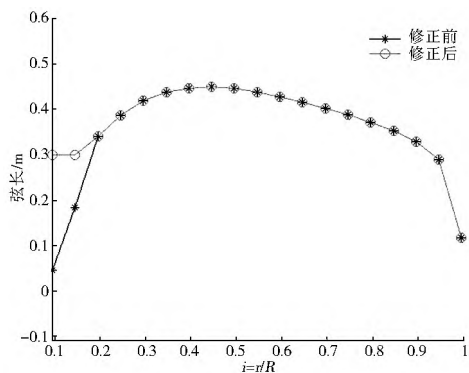


图 2 叶片弦长分布

Fig. 2 Distribution of the blade chord length

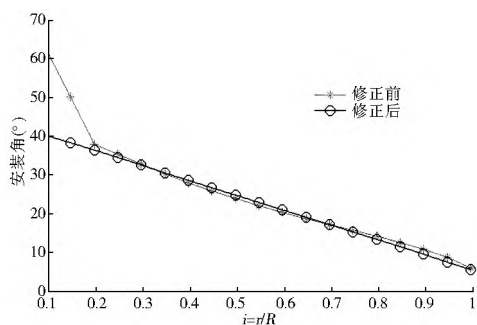


图 3 叶片安装角分布

Fig. 3 Distribution of the setting angle of blade

2 数值模拟

2.1 叶片三维模型的建立与网格划分

本文采用 UG 软件建立叶片的三维模型, 叶片的三维模型见图 4。设定外流场为直径 14 m、长 25 m 的圆柱体, 内流场为直径 4 m、长 0.7 m 的圆柱体, 风轮置于内流场中, 正对来流方向, 内流场距离外流场入口 7 m。由于风力提水机设置有机控制装置进行自动对风, 因此即使风向发生改变, 也能保证风轮始终保持迎风方向, 故在进行 CFD 计算时无需考虑风向变化的影响。由于叶片扭曲程度较严重, 结构化网格对复杂空间的适应能力不如非结构化网格, 而且非结构化网格不受网格节点结构性的限制^[8], 各网格单元的形状、大小及节点的位置更加易于控制, 与结构化网格相比更为灵活, 因此采用非机构化网格对风轮以及外流场进行网格划分。在网格划分的时候采用三角形网格划分, 并利用尺寸函数对叶片的前缘面以及后缘面进行局部加密, 提高网格质量; 边界层网格第一层 Y^+ 值基本保持在 1.5 以内, 以获得更加精确的求解结果; 在划分各个区域内部的体网格时采用四面体和混合体网格, 网格总数为 358 万。



图 4 叶片的三维模型

Fig. 4 Three dimensional model of blade

2.2 边界条件的确定

外流场的入口为速度进口, 出口设定为压力出口; 内外流场交接的区域面设置为交界面, 交界面采用滑移网格处理; 将叶片设定为无滑移的旋转壁面, 并将包围叶片的内流场设置为旋转体; 临近固体壁面的区域采用对数式壁面函数进行处理。

2.3 湍流模型的选取

本论文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算。SST $k-\omega$ 湍流模型对于处理近壁自由流以及预测近壁区域绕流和旋流方面有着明显的优势^[19], 因此利用 SST $k-\omega$ 湍流模型来预测风轮的叶片绕流运动是比较合适也是比较精确的。

2.4 方程离散化以及求解方法的选取

由于研究的流体为具有压缩性的空气, 考虑到网格数量较大, 叶片扭曲程度较高, 因此选用计算效率高的有限体积法进行方程的离散化; 使用 greer Gauss cell based 格式进行梯度插值; 对离散原项、扩散项和对流项皆采用二阶迎风格式差分以提高计算精度; 模型的求解方法采用基于压力的求解器; 压力速度耦合方程采用 SIMPLE 算法。

3 计算结果与分析

3.1 叶片参数特性曲线分析

根据设计的风轮, 建立了物理模型在河海大学风洞实验室进行了实验。图 5 为额定风速不同叶尖速比 λ 对应 C_p 的数值模拟结果与实验结果的对比曲线, 可以看出数值计算的结果与在风洞中的实验结果趋势大体一致, 实验数据显示在 λ 为 2.4 附近 C_p 取得最大值为 0.456, 数值模拟显示当 λ 为 2.4 时风轮获得了最大的风能利用系数 0.463, 与计算结果

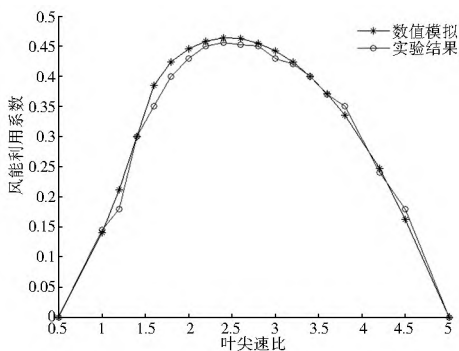


图 5 $C_p - \lambda$ 曲线

Fig. 5 $C_p - \lambda$ curves

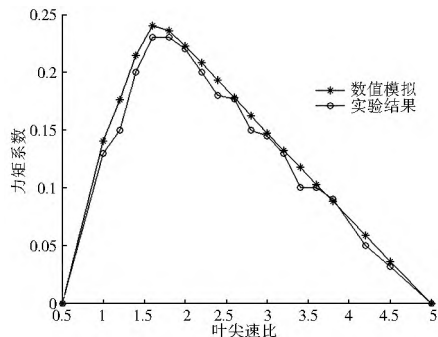


图 6 $C_m - \lambda$ 曲线

Fig. 6 $C_m - \lambda$ curves

的误差在允许范围内,可见本文所设计的叶片的确具有较高的风能利用率。图 6 为力矩系数 C_m 与叶尖速比 λ 的关系曲线,由数值模拟得出风力提水机在额定风速时最大输出扭矩为 $22 \text{ N} \cdot \text{m}$,与实验结果的 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 接近,两者的误差在允许范围内。当扭矩大于 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,可带动扬程 10 m 的设计配套活塞泵开始工作,故设计的提水机可起动车。

3.2 叶片表面压力分析

风力提水机在 2.5 m/s 风速下时,风力机叶片压力面的压力分布云图见图 7,吸力面的压力分布云图见图 8。从图 7 中可以看出,在压力面上压力梯度最大的地方位于叶片靠近叶尖的前缘处,这是因为叶片在旋转时叶尖前缘部分最先接触来流,速度梯度发生了较大的变化,导致叶片前缘处为压力最大的区域。叶片在轮毂附近为负压区,除此之外叶片的压力面上压力分布均匀,无高压集中区。

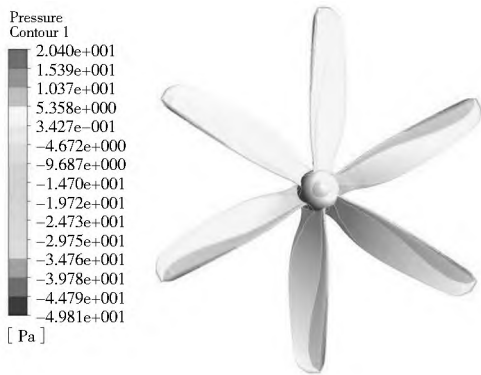


图 7 叶片压力面压力分布云图

Fig. 7 Contour plot of pressure distribution for the blade pressure surface

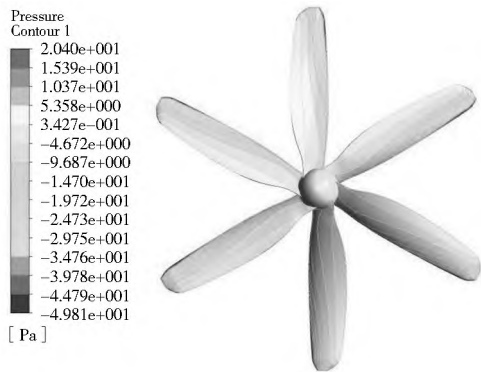


图 8 叶片吸力面压力分布云图

Fig. 8 Contour plot of pressure distribution for the blade suction surface

从图 8 中可以看出叶片的吸力面上存在大面积的负压区,负压大多集中在叶片前缘附近,压力从前缘到后缘呈现逐渐增大的趋势。从叶片压力面以及吸力面的压力分布云图可以看出,气流在流向风轮的过程中压力不断增大,流经风轮之后压力突然减小,甚至形成负压,叶片压力面和吸力面的压力差使得叶片沿塔架方向产生一个推力,这个推力既是加载在塔架上的载荷,也是叶片所获得的升力,使得风轮吸收了来流中的部分风能转化为机械能转动,即所设计的风力提水机在 2.5 m/s 的微风下是可以起动的。

3.3 叶片三维流动特性分析

图 9 为叶片旋转时风轮所在流场的流线图,可以看出流

过风轮的气流由于受到风轮旋转作用的干扰,尾迹呈螺旋状并与风轮的旋转方向相反,流场流态变化剧烈,但是并没有出现漩涡或者回流的现象;气流流速在风轮附近最大,在远离风轮处速度逐渐减小至来流风速。这个特性的研究对风场的选址以及风力机的排布有着极其重要的意义,因为风机尾流的影响范围是广阔的,尤其是对于年平均风速较低的地区,合理的风机排布可以减少尾流干扰,大大提高风能利用率。

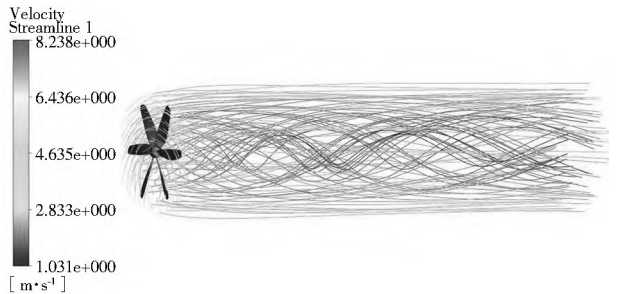


图 9 风轮所在流场流线

Fig. 9 The streamlines for the flowing field of wind rotor

图 10 为额定工况下叶片 $20\% R$ (根部)、 $50\% R$ (中部) 以及 $80\% R$ (叶尖) 处的截面流线图。从图中可以看出,在额定工况下叶片的主要功率输出部分翼型表面流动平稳,在翼型的尾部并没产生漩涡或者脱流的情况,叶片并未发生流动分离,气流流动平顺稳定,证明所设计的叶片具有合理的安装角,使得叶片的每个叶素都处在最佳攻角的状态。

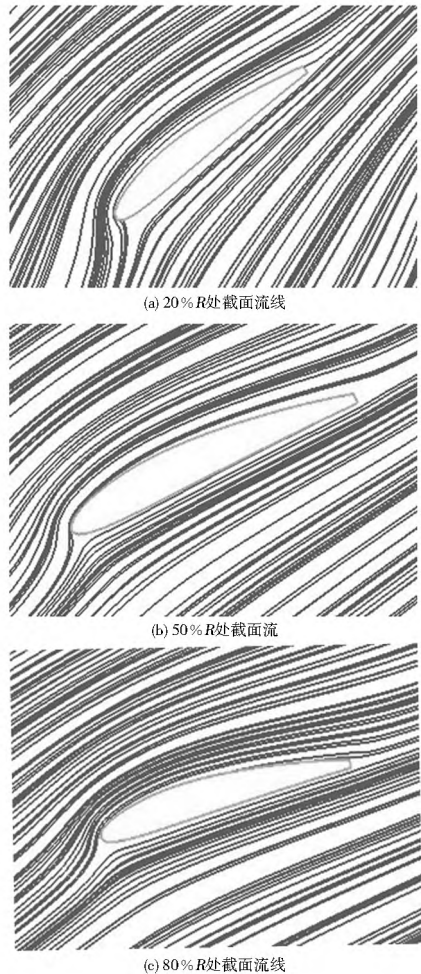


图 10 额定工况下叶片截面流线

Fig. 10 The section streamlines of the blade under certain condition

图 11 为叶片吸力面的极限流线图。由于在数值模拟的时候将叶片设定为无滑移的壁面,故在叶片表面无速度。由于叶片表面剪切力 τ 为速度 U 与半径 r 的导数,因此对于叶片的分离现象,可以利用叶片表面剪切力的分布情况来判别。从图 11 的叶片吸力面的极限流线图中可以看出,在额定工况下叶片的二维流动特性明显,叶片旋转时气流都是沿着叶片的弦线方向流过风轮,不存在径向流动,没有明显的气流分离线,所以未见明显的流动分离现象,说明所设计的风力提水机风轮在额定工况下的气动特性良好,风轮对风能的捕获能力较强。

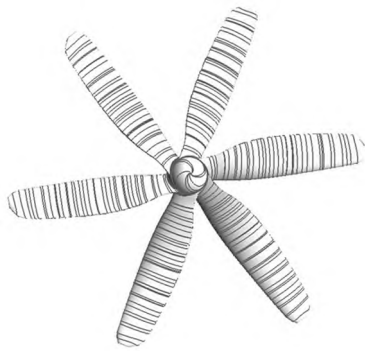


图 11 额定工况下叶片吸力面极限流线

Fig. 11 The limiting streamlines of the blade suction surface under certain condition

4 结论

(1) 将叶素理论引入小型风力提水机风轮的设计中,以风能利用系数以及扭矩作为目标函数通过 Matlab 进行多目标优化求解,设计出了中扬程小流量风力提水机的风轮叶片,适用于年平均风速较低的地区。

(2) 风轮具有六个叶片,为同扬程 FT-2 5 型风力提水机叶片数的 1/4,大大降低了风轮的实度,节约了成本;通过数值模拟则表明所设计的风力提水机在 2.5 m/s 的微风下就能起动,并且通过实验进行对比证明在 3 m/s 的额定工况下风能利用率高达 0.46 左右,较传统风力提水机提高了 30%;在额定风速下扭矩达到 22 N·m,满足设计扬程的需要。

(3) 风轮的压力分布云图以及叶片的三维流动特性表明,本文所设计的风轮除了因为旋转效应导致叶尖前缘出现较大的压力梯度外,在额定工况下叶片表面压力分布均匀,流场没有出现漩涡或者回流,叶片表面亦没有出现流动分离的现象,三维流动特性好。

参考文献(References):

[1] 王士荣,沈德昌,刘国喜. 风力提水与风力制热[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WANG Shi rong, SHENG De chang, LIU Guo xi. Wind water pumping and wind heat[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))

[2] 王建忠. 风力提水技术[J]. 内蒙古水利, 2000(4): 50-51. (WANG Jian zhong. Wind water pumping technology[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2000(4): 50-51. (in Chinese))

[3] 刘惠敏. 风力提水技术的现状与展望[C]. 2009 中国可持续发展论坛暨中国可持续发展研究会学术年会论文集(下册),

2009. (LIU Hui Min. The wind driven current situation and Prospect of water technology[C]. Chinese sustainable development forum and the study on the sustainable development of China Will Symposium(Volume 2), 2009(in Chinese))

- [4] Fur yin D. Study on the Intelligent Control Strategy for a Pumping Water Machine Driven by Wind Power[J]. Journal of Xha Nvry(NaraIndon), 2012.
- [5] 丁莹,何占松. 我国风力提水设备应用现状及发展方向[J]. 农村牧区机械化, 2012(2): 50-52. (DING Ying, HE Zharr song. The Wind driven current application status and development direction of water equipment in our country[J]. Mechanization In Rural & Pastoral Areas, 2012(2): 50-52. (in Chinese))
- [6] 刘惠敏,王世锋,朱俊峰. 风力提水技术发展历程[C]. 2011 中国可持续发展论坛 2011 年专刊(一), 2011. (LIU Hui min, WANG Shi feng, ZHU Jun feng. Wind water pumping technology development[C]. 2011 China Sustainable Development Forum 2011 column(1), 2011. (in Chinese))
- [7] 沈德昌,马金琪. FDG-7 型大流量风力提水机组的研制[J]. 农业机械学报, 1991(2): 44-47. (SHENG De chang, MA Jing qi. The development of FDG-7 windpump[J]. Chinese Academy Of Agricultural Mechanization Science, 1991(2): 44-47. (in Chinese))
- [8] 魏建明,沈德昌,马金琪. FDG-7 型风力提水机组风轮模型风洞选型的试验研究[J]. 农业工程学报, 1991(1): 99-106. (WEI Jian ming, SHENG De chang, MA Jing qi. A study on aerodynamic properties of model FDG-7 wind pumper with wind tunnel. [J]. Transaction of CSEA, 1991(1): 99-106. (in Chinese))
- [9] 卢宏宇,陈海涛. FTJ 4.8-10-68 型风力提水机风轮机构的设计与数据分析[J]. 农村牧区机械化, 2014(3): 40-42. (LU Hong yu, CHEN Hai tao. The design and date analysis of The water pumping wind rotor of model FTJ 4.8-10-68. [J]. Mechanization In Rural & Pastoral Areas, 2014(3): 40-42. (in Chinese))
- [10] 张帆,刘宽宝,黄毅成. 风力提水机外场试验及优化设计[J]. 江苏农机化, 2012(2): 27-29. (ZHANG Fan, LIU Kuai bao, HUANG Yi cheng. Wind water pumping machine field experiment and optimization design [J]. JIANGSU Agricultural Mechanization, 2012(2): 27-29. (in Chinese))
- [11] 史久瑞,郑中军,沈德昌. 多叶式风轮模型气动特性的风洞试验研究[J]. 农业机械学报, 1985(4): 74-84. (SHI Jiu rui, ZHENG Zhong jun, SHENG De chang. Test and research on aerodynamic properties of multi-blade rotor models in wind tunnel[J]. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science. 1985(4): 74-84. (in Chinese))
- [12] 李海涛. 对 FTJ 4.8-10-68 型风力提水机的改进[J]. 农村牧区机械化, 2013(1): 47-48. (LI Hai tao. Improvement of model FTJ 4.8-10-68 water pumping wind mill [J]. Mechanization In Rural & Pastoral Areas, 2013(1): 47-48. (in Chinese))
- [13] 胡建栋,邹占武,徐双信. FSH-400 型风力提水机的设计试验研究[J]. 太阳能学报, 2013(05): 895-901. (HU Jian dong, ZOU Zharr wu, XU Shuang xin. Design test and research of FSH-400 type wind power water pumping machine [J]. Acta Energiae Solstis Sinica, 2013(05): 895-901. (in Chinese))
- [14] 陈云程,陈孝耀,朱成名. 风力机设计与应用[M]. 上海: 科学技术出版社, 1990. (CHEN Yun cheng, CHEN Xiao yao, ZHU Cheng ming. Design and application of wind turbine [M]. SHANGHAI: Science and Technology Press, 1990. (in Chinese))

(下转第 529 页)

- HUANG Yan. Research on Yangtze River Basin water resources management and decision support system[J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 34(1): 5-8. (in Chinese)
- [6] 王俊. 长江流域水资源综合管理决策支持系统研究[J]. 人民长江, 2012, 43(21): 6-10. (WANG Jun. Research on Yangtze River Basin integrated water resources management decision support system[J]. Yangtze River, 2012, 43(21): 6-10. (in Chinese))
- [7] 侯丽娜. 基于来水和需水的周期性及不确定性的水资源配置模型[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HOU Li na. Study on water allocation model based on periodic and uncertainty of incoming water and water demand[D]. China Institute of Water Resources and Hydropower Reserch, 2013. (in Chinese))
- [8] 陆曼曼. 南宁市水库防汛气象监测预警系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (LU Man man. Design and implementation of Nanning flood control and weather monitoring and warning system of the reservoir[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese))
- [9] 陈辉, 宋全香, 焦君让. 河南省水资源动态配置研究[J]. 人民长江, 2013, 44(16): 86-89. (CHEN Hui, SONG Quan xiang, JIAO Jun rang. Research on water resources dynamic allocation in Henan [J]. Yangtze River, 2013, 44(16): 86-89. (in Chinese))
- [10] 左其亭. 论水资源承载能力与水资源优化配置之间的关系[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1286-1291. (ZUO Qi ting. Relationship between carrying capacity and optimal deployment of water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 1286-1291. (in Chinese))
- [11] 雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 等. 通用水资源调配模型 WROOM I: 理论[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 225-231. (LEI Xiao hui, WANG Xu, JIANG Yun zhong, et al. General water resources distribution model WROOM I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 225-231. (in Chinese))
- [12] 雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 等. 通用水资源调配模型 WROOM I: 应用[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 282-288. (LEI Xiao hui, WANG Xu, JIANG Yun zhong, et al. General water resources distribution model WROOM I: Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 282-288. (in Chinese))
- [13] 王桂平, 张帅. LAOV 网络及其拓扑排序算法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3): 170-175. (WANG Gui ping, ZHANG Shuai. The LAOV network and its topological sorting algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(3): 170-175. (in Chinese))
- [14] 原慧琳, 汪定伟. 基于设计结构矩阵. 拓扑排序新方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(6): 790-792. (YUAN Hui lin, WANG Ding wei. New topological sort based on the design structure matrix[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(6): 790-792. (in Chinese))
- [15] 李军, 曹震, 杨晓光. 报表系统中公式依赖关系分析及计算性能优化[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2228-2234. (LI Jun, CAO Zhen, YANG Xiao guang. Formula dependency analysis and performance optimization of calculation in spreadsheet system[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(6): 2228-2234. (in Chinese))
- [16] 赵春燕. 水系河网的 Horton 编码与图形综合研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (ZHAO Chun yan. Research on Horton code and graphic generalization of catchment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [17] 蔡治国, 王光谦, 魏加华. 黄河流域水量调度的自校正控制模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1660-1663. (CAI Zhi guo, WANG Guang qian, WEI Jia hua. Self tuning control model for the Yellow River water regulation system [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(12): 1660-1663. (in Chinese))
- [18] 刘荣华. 塔里木河流域水量统一调度模型研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2005. (LIU Rong hua. Research on water regulation model of Tarim River and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese))
- [19] 仲志余, 李文俊, 安有贵. 三峡水库库容研究及防洪能力分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 36-38. (ZHONG Zhi yu, LI Wei jun, AN You gui. Research on dynamic capacity of flood control capacity of the three gorges reservoir [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(3): 36-38. (in Chinese))
- [20] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (QU Guo dong. Study on regional water resources rational allocation and its program comprehensive benefits evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))

(上接第 501 页)

- [15] 包飞. 风力机叶片几何设计与空气动力学仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (BAO Fei. Geometric design and aerodynamic simulation for the wind turbine blades[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [16] 翟旭军. FT-2.5 型风力提水机的分析研究与改进设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. (DI Xu jun. Analysis design research and improvement of FT-2.5 wind pump [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese))
- [17] 郭进勇. 1.5MW 风力机风轮叶片气动性能数值模拟与分析[D]. 成都: 西华大学, 2010. (GUO Jing yong. Numerical simulation of aerodynamic performance and analysis of 1.5 MW wind turbine blades[D]. Chengdu: Xihua University, 2010. (in Chinese))
- [18] 盛立君, 郑源, 杨春霞, 等. 用于水厂微水头发电的灯泡贯流水轮机开发[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 255-259. (SHENG Li jun, ZHENG Yuan, YANG Chun xia, et al. Development of bulb tubular turbine used in micro water head hydropower generation in water plants[J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2014, 12(6): 255-259. (in Chinese))
- [19] 丁琳, 郑源, 张福星. 基于流固耦合的垂直轴风机受力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 84-88. (DING Ling, ZHENG Yuan, ZHANG Fu xing. Stress analysis of vertical axis wind turbine based on fluid structure coupling[J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2013, 11(4): 84-88. (in Chinese))