

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.008

水平轴潮流能捕获桨叶翼型的性能分析与优化*

朱 斌^{1,2}, 郑 堤^{1,2*}, 乔 峰¹, 陈俊华²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学宁波理工学院 机能学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:针对水平轴潮流能发电桨叶专用翼型的设计问题,对翼型的流场、翼型捕获能量的机理、二维翼型的升阻力系数和 x 方向切应力系数等方面进行了研究,对航空翼型与风力发电机专用翼型在捕获冲击能量上的不足之处进行了探讨,提出了一种水平轴潮流能发电桨叶专用翼型的设计方法,该翼型能综合利用压差升力与冲击作用力,从而提高潮流能的整体捕获效率。基于叶素动量理论并借助 Matlab 迭代,求解出了桨叶 21 个截面的弦长与扭角,利用 Cincinnati 加工中心制作了桨叶并在水槽实验平台上进行了试验,观察并记录发电数据。试验结果表明,通过增加翼型尾部弯度能有效提高水平轴潮流能发电桨叶的自启动性能和能量捕获效率,验证了该设计方法的正确性与有效性。

关键词:潮流能;翼型;压差升力;冲击作用力;自启动性能;能量捕获效率

中图分类号:TH122;TK79

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0778-05

Analysis and optimize on the performance of blade airfoil of horizontal axis marine current turbine

ZHU Bin^{1,2}, ZHENG Di^{1,2}, QIAO Feng¹, CHEN Jun-hua²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. School of Mechanical and Energy Resource Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Aiming at the design problem of dedicated airfoil of horizontal axis marine current turbine, the flow field, the mechanism of energy capture, the lift/drag coefficient and the shear stress in the x direction were researched, the shortage of aviation airfoils and special wind turbine airfoils in terms of the capture of the impact energy was investigated, a method was presented to design the dedicated airfoil for horizontal axis marine current turbine, both the differential pressure lift and impact forces could be comprehensive used, the efficiency of energy harvesting could be improved. The software of Matlab was used to calculate the blade shape parameters, the blade was produced by the CNC of Cincinnati and was tested on the experiment platform, the data of power generation were recorded. The results indicate that increase the camber of airfoil can effectively improve the performance of launch and efficiency capture, the correctness and validity of the design method was proven.

Key words: tidal current energy; airfoil; differential pressure lift; impact force; performance of self-starting; efficiency of energy harvesting

0 引 言

潮流能的开发利用是当前一个热点前沿问题,我国潮流能资源丰富,逐步提高潮流能捕获效率、高效利用潮流能发电,对于优化我国的能源消耗结构、缓解沿

海地区的能源压力具有深远意义。

桨叶是潮流能发电的关键部件,如将桨叶沿翼展方向分成 n 个截面,每个截面都是一个叶素,而这些叶素是具有不同外形特征的二维翼型^[1-3],不同的翼型升阻力系数和导流性能有很大差别,对潮流能捕获有很

收稿日期:2015-02-04

基金项目:国家海洋局专项资金资助项目(NBME2011CL02)

作者简介:朱 斌(1989-),男,浙江宁波人,主要从事海洋能装备制造方面的研究. E-mail:624938988@qq.com

通信联系人:郑 堤,男,博士,教授. E-mail:zhengdi@nit.zju.edu.cn

大影响。在水平轴潮流能桨叶的设计方面,目前普遍采用的是航空翼型和风力发电机专用翼型,缺少适合潮流流动特点的专用翼型。

国内外学者做了大量有关提高水平轴潮流能捕获装置桨叶翼型设计的研究,并得到了较好的成果。Batten W M J等^[4]曾报道利用实验验证的数值方法设计水平轴潮流能水轮机,提高了潮流能捕能效率;王俭超等^[5-7]基于 CFD 软件针对传统翼型几何形状进行数值仿真,获得了不同翼型的升阻力系数,为翼型选择提供了参考;罗先武等^[8]对翼型的流动特性进行分析,为小型潮流能叶片的设计提供了参考;余清清等^[9]利用变桨距方式提高潮流能捕获装置在多变流速下的捕能效率。

本研究在上述研究的基础上,通过计算仿真分析确定翼型的修改方案,在保证翼型的升力系数与阻力系数未发生较大改变的前提下设计得到综合利用压差升力和冲击作用力的翼型,提高桨叶整体的能量捕获效率和自启动性能。

1 翼型分析

1.1 翼型周围流场分析

现有的水平轴潮流能桨叶的设计基本都是基于风力发电 Glanert 设计模型,将桨叶的流场视为一个流体绕翼型流动产生压差升力的流场,忽略冲击作用力。本研究通过分析发现大质量流冲击一个大面域产生冲击作用力,在叶轮直径较小时量级与压差升力相当,而目前水平轴潮流能发电所用叶轮直径受限于近海深度和涨潮落潮影响普遍在 5 m 以内,远远无法达到风力发电机的叶轮直径,冲击作用力不能简单略去。

经分析简化后的翼型周围的流场如图 1 所示。

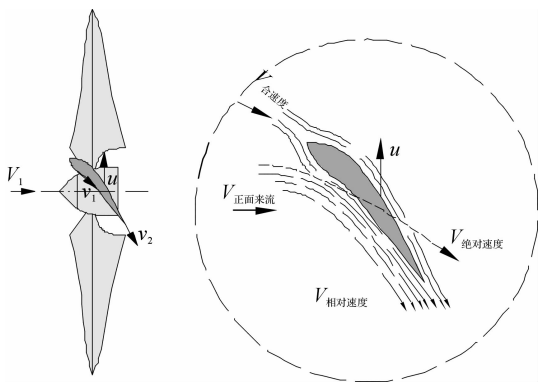


图1 翼型流场

u —桨叶旋转产生的切向速度

图 1 中,将翼型周围流场分解为一个绕翼流动产生的压差升力流场和一个来流直接冲击翼型产生的冲

击作用力流场。翼型前端水流以合速度 $V_{合速度}$ 绕流翼型产生压差升力;翼型下方形成一个射流区,由于桨叶转动,水流的绝对运动速度方向如 $V_{绝对速度}$ 所示,相对于桨叶的速度方向如 $V_{相对速度}$ 所示。

1.2 冲击捕能分析

1.2.1 冲击捕能原理

冲击作用力的产生:对于宏观低速流体,牛顿碰撞理论有较高精度。流体质点流与物面碰撞时,流体质点将失去与物面垂直的法向动量,而保持原有的切向动量沿物面向下流去。由于法向动量的变化从而引起流体作用在物体上的力。

1.2.2 冲击作用力产生条件

流体质点冲击物面,物面所受的作用力来源于流体速度(大小、方向)的改变,碰撞后质点的速度方向逐渐与物面平行,而后质点将不在对物面产生作用力。

现有的水平轴潮流能发电机械翼型采用的多是传统的航空翼型和风力发电机专用翼型,这类翼型为得到较大的升力系数和较小的阻力系数,翼型下表面中后部位几乎没有弯度,且整个翼型的曲率一般都不超过 6%,很难捕获冲击作用力。

2 优化翼型

2.1 优化目标

翼型结构优化的目标:在保证翼型的升力系数与阻力系数不发生较大的改变的前提下,实现翼型冲击捕能的最大化。现有翼型的普遍特点:弯度小,且主要弯曲部分集中在前部,尾部几乎没有弯度,不适合冲击捕能。对于定桨距的潮流能捕获装置而言,启动时,桨叶旋转的切向速度很小,入流攻角很大,一般情况下当攻角大于 13° 时压差升力迅速减小,阻力迅速增大,启动所需转矩大部分来源于冲击捕能,由于现有翼型不适合冲击捕能,直接导致自启动性能不佳。

2.2 结构优化方法

本研究通过增加尾部翼型弯度的方法增加冲击捕能。

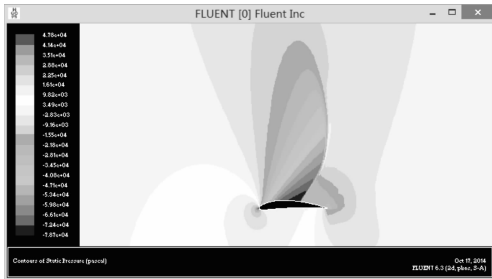
2.2.1 确定可以优化的部位

本研究借助 fluent 对翼型的压力场进行模拟,观察翼型上、下表面压力系数分布。为了能明显看到翼型压力分布的特点,笔者采用高速流体,具体设置参数如表 1 所示。

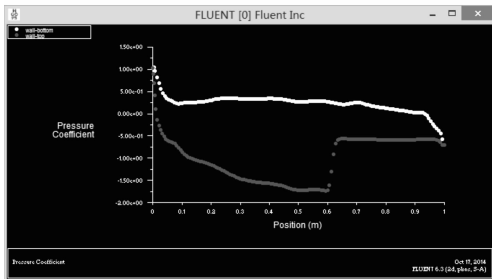
迭代 200 步后收敛的压力分布云图和压力系数图如图 2 所示。

表 1 模拟参数

参 数	潮流能数值
流速 V/Ma	0.8
计算模型	Pressure based 耦合求解器
湍流模型	Spalart-Allmaras
入流攻角 φ	10°



(a) 压力分布云图



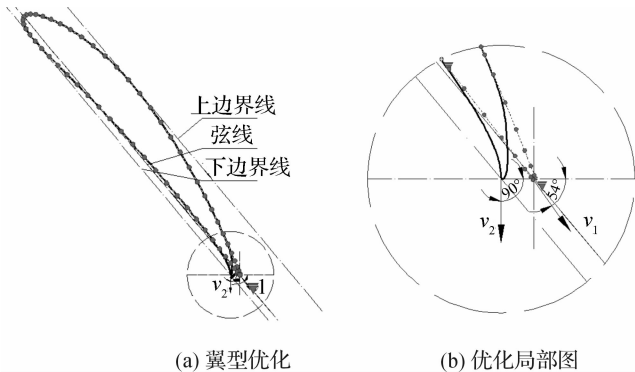
(b) 压力系数

图 2 压力分布

在图 2 中能明显看出,翼型上表面形成一个负压,下表面形成一个正压,整体产生一个托举力。且压力主要集中于翼型前部,本研究对图 2(b)中压力系数的面域进行计算,翼型后 1/5 部分只提供了不到 10% 的升力,可以对这部分进行优化。

2.2.2 翼型结构优化

以 Naca6412 翼型为原外形,优化后外形如图 3 所示。图 3 是桨距角为桨距角 40° 时翼型优化的一个例举。



(a) 翼型优化

(b) 优化局部图

图 3 翼型结构优化

结构设计约束:

(1) 为了不额外增加翼型在水中的阻力,划了平行于

弦线的上、下边界线,优化后翼型必须在该范围内。

(2) 尾部增加了弯度,出流速度方向与水平线夹角不得超过 90° ,超过 90° 后水流反向流动,既阻碍了前方水流,又大大增加了轴向载荷。

(3) 弯度的变化要均匀,弯度突变会使冲击变成撞击,产生能量损失。

(4) 弯度的增加,不能使流体的边界层发生严重分离产生紊流,紊流会使阻力大大增加,且会使流体发生振动。

图 3 中,灰色点为原翼型外形,翼型尾部 1/5 增加了弯度,使出流速度与水平线的夹角增加 36° 。

从宏观上看,流体流经叶轮所产生的转矩可以看作两个单独的力所产生的力矩之和,且这两个力都集中作用在进口和出口处。对不可压缩的定常流体而言,总转矩为^[10]:

$$T = \rho Q (r_1 V_1 \cos \alpha_1 - r_2 V_2 \cos \alpha_2) \quad (1)$$

其中: $V_2 \cos \alpha_2 = u - v_2 \cos \beta_2$ 。

式中: u —桨叶旋转切向速度, v_2 —出口处流体相对翼型速度, β_2 —出口处翼型下底面与旋转平面夹角, ρ —流体密度, Q —流量, r_1 —入口处流体等效半径, r_2 —出口处流体等效半径, V_1 —进口绝对速度, V_2 —出口绝对速度, α_1 —进口绝对速度与旋转方向夹角, α_2 —出口绝对速度与旋转方向夹角。

翼型尾部弯度增加后,主要减小了出口处翼型下底面与旋转平面夹角,使 $\cos \beta_2$ 增大,控制转速即 u 不变, $V_2 \cos \alpha_2$ 则随之减小,由式(1)知转矩 T 增大。

2.2.3 优化后翼型的升阻力系数模拟

本研究在网格划分中对翼型附近圆形区域做了加密处理。

结构优化必须保证升力系数未发生较大的减小,阻力系数未有较大的增加。Naca6412 翼型和优化翼型在相同雷诺数下模拟得到的升阻力系数如图 4 所示。在 10° 攻角时达到最大升力系数,升力系数达到 1.37,与原 Naca6412 翼型的最大升力系数 1.375 相近,阻力系数为 0.192,略高于 Naca6412 翼型的 0.172。升阻力系数均未出现较大变化,符合要求。

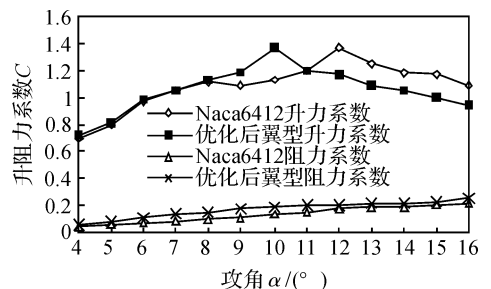


图 4 升阻力系数

翼型弯度增加后有可能发生严重的边界层分离,大大增加阻力,并发生振动,笔者绘制的翼型上、下壁面切应力的 x 分量如图 5 所示。

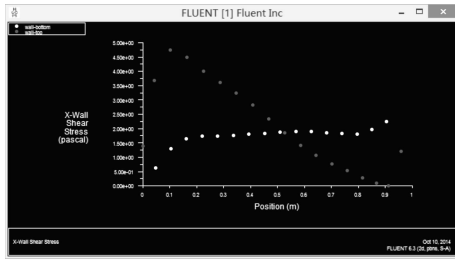


图 5 切应力 x 方向分布

逆向流动可以通过壁面切应力的 x 分量是否为负值来判断,由图 5 可见切应力均大于零,未发生边界层分离产生紊流,符合设计要求。

3 实验验证

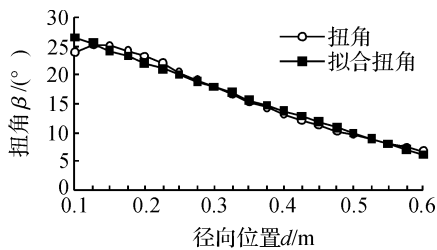
3.1 桨叶设计

桨叶的基本设计参数如表 2 所示。

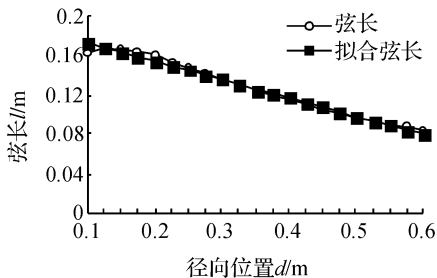
表 2 桨叶的基本设计参数

参数	数值
设计流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	1.2
额定功率 P/W	160
叶轮直径 D/m	1.2
轮毂直径 D_{hub}/m	0.2
叶片数目 $B/\text{个}$	6

本研究利用 Matlab 迭代求解式(2~5)得桨叶弦长、扭角^[11],桨叶外形参数如图 6 所示。



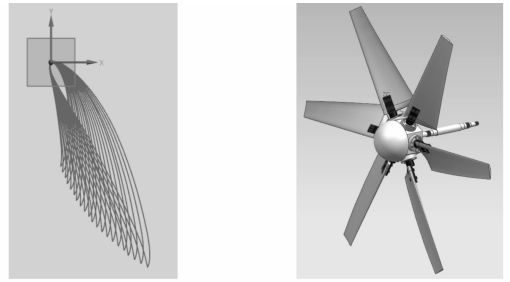
(a) 扭角分布



(b) 弦长分布

图 6 桨叶外形参数

桨叶 UG 三维造型如图 7 所示。桨叶可手动变桨距角。



(a) 桨叶 21 个截面俯视图分布 (b) 潮流能捕获装置三维造型

图 7 UG 三维造型

$$\beta = \arctan\left(\frac{1-a}{1+b\lambda}\right) - 13^\circ \quad (2)$$

$$l = \frac{2\sin^2\varphi}{3C_L\cos\varphi}\left(\frac{4\pi ra}{1-a} - \frac{4}{9}\pi r\right) \quad (3)$$

$$b = \frac{a(1-a)}{\lambda_{\text{叶尖}}^2\mu^2} \quad a = \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1-a}{1+b\lambda}\right) - 13^\circ \quad (5)$$

式中: a —轴向诱导系数, b —切向诱导系数, C_L —升力系数, r —半径, φ —入流角, β —扭角, l —弦长。

3.2 实验装置

潮流能发电装置安装于大型水槽试验平台,安装桨叶完毕后的照片如图 8 所示。



图 8 实验装置

水槽长 100 m,宽 4 m,深 3.5 m,平台与链条连接,由伺服电机做速度控制。潮流能发电装置由桨叶、一级链轮、行星增速器、200 W 三相永磁同步发电机、负载控制、数据采集模块组成。行星增速器选用速比为 5:1,电气系统由整流器、逆变器、大功率电阻等组成,西门子 PLC 为主控系统,笔者利用西门子 A/D 转换模块将三相电量采集卡采集到的模拟信号转换为数字信号,借助西门子 OPC 和上位机 LabVIEW 编写的监控控制程序通信,可以在电脑上直观显示以及记录运行时的各个参数。

3.3 测试结果

在实验过程中,本研究记录捕能装置的三相输出电压与电流,并转化为功率数据记录如图 9 所示。

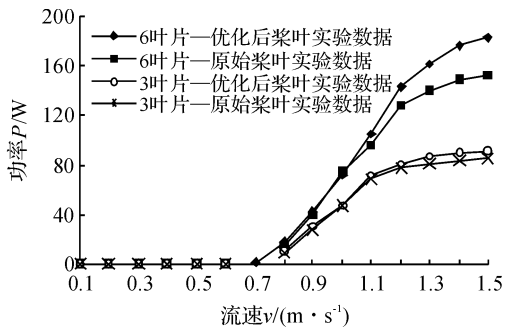


图9 最大有用功率

从图9中看出,优化后的桨叶(6叶片)在平台移动速度达到1.2 m/s附近时功率上升趋势变缓,桨叶(3叶片)在1.1 m/s附近功率上升趋势变缓,即压差升力达到最大,当大于临界速度时,翼型开始进入失速状态,而冲击作用力随平台速度增加而增加,整体表现为功率缓慢增加。将优化后桨叶与原始桨叶对比发现,在自启动性能上优化后桨叶优于原始桨叶;在临界速度前两者功率相差不大,之后发电功率逐渐拉大,可见在撞击捕能上优化后桨叶占优势。

从6叶片与3叶片桨叶的对比也可以发现,在叶轮直径较小的情况下,适当增加密实度大大增加捕能效果,在超过临界速度以后更加显著,这也说明冲击作用力在小叶轮中的作用很大。

4 结束语

通过理论分析、模拟仿真以及桨叶的制作与实验验证,本研究可以得出以下结论:

(1) 桨叶转矩是流体的绕翼型流动产生的压差升力和冲击作用力共同作用的结果。叶轮半径越小冲击的影响越不能忽略。

(2) 翼型的设计时综合考虑压差升力和冲击捕能效果是有必要的。

(3) 仿真结果表明优化后的翼型在升阻力系数上未发生较大变化,理论分析表明在冲击捕能上有一定提高。

(4) 实验结果表明,翼型达到设计要求,定桨距桨叶无论在自启动性能上,还是在稳定运行时的捕能效率上都有一定提高。但限于实验测试设备,还未对动

扭矩、推力等数据进行测量。

致 谢

实验装备的加工是浙大宁波理工学院工程训练中心完成的,盛刚、李贤义工程师承担了大量加工工作,对他们谨致谢意。

实验工作是在浙大宁波理工学院机能学院海洋装备研发中心完成的,谨致谢意。

参考文献(References):

- [1] 徐学涛. 水平轴潮流能发电机械叶片设计及特性分析[D]. 杭州:浙江大学机械学院,2012.
- [2] 铁 庚,祁文军. 水平轴风力叶片机翼型的气动特性数值模拟[J]. 流体机械,2013,41(3):29-33.
- [3] 姜海波,曹树良,李艳茹. 水平轴风力机叶片扭角和弦长的理想分布[J]. 太阳能学报,2013,34(1):1-6.
- [4] BATTEN W M J, BAHAJ A S, MOLLAND A F, et al. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines[J]. *Renewable Energy*,2008,33(5):1085-1096.
- [5] 王俭超. 水平轴潮流水轮机叶片设计和模型试验研究[D]. 青岛:中国海洋大学海洋科学学院,2011.
- [6] KIM B, KIM W, BAE S, et al. Aerodynamic design and performance analysis of multi-mw class wind turbine blade[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011,25(8):1995-2002.
- [7] HARTWANGER D, HORVAT A. 3D Modelling of a Wind Turbine using CFD[C]// NAFEMS UK Conference, Cheltenham:[s. n.],2008:1-4.
- [8] 罗先武,王 鑫. 小型潮流水轮机叶片对称翼型的流动特性分析[J]. 水力发电学报,2010,29(2):239-243.
- [9] 余清清,孙 勇,周 浩. 基于转矩补偿的风电变桨加载系统的研究及仿真[J]. 机电工程,2014,31(11):1457-1460.
- [10] FINNEMORE E J, FRANZINI J B. Fluid mechanics With engineering applications [M]. America: McGraw-Hill, 2005.
- [11] 马 舜,李 伟,刘宏伟,等. 水平轴潮流能发电系统能量捕获机构研究[J]. 机械工程学报,2010,46(18):150-157.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

朱 斌,郑 堤,乔 峰,等. 水平轴潮流能捕获桨叶翼型的性能分析与优化[J]. 机电工程,2015,32(6):778-782.

ZHU Bin, ZHENG Di, QIAO Feng, et al. Analysis and optimize on the performance of blade airfoil of horizontal axis marine current turbine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(6):778-782.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>