

# 水平轴潮流能无源自适应双向流叶片设计与研究

陈健梅<sup>1</sup>, 吴百公<sup>2</sup>, 朱挽强<sup>1</sup>, 徐明奇<sup>1</sup>, 董永军<sup>1</sup>, 张雪明<sup>1</sup>

(1. 东北师范大学, 吉林省先进能源开发及应用创新重点实验室, 长春 130024; 2. 江苏科技大学海洋装备研究院, 镇江 212003)

**摘 要:** 研究自适应双向流无源自变距的新型叶片,通过理论和实验对前掠叶片、后掠叶片和平直叶片的变桨原理,自适应流向和流速变化原理进行分析和验证,对水动力变距补偿翼的作用进行分析。该文所设计的自适应叶片在合理调配后掠角变化和主轴位置后可实现小范围内叶尖速比的调整。通过理论分析和模型试验研究验证设计的正确性和实用性。在此基础上应用于 15 kW 海洋潮流能样机,并在青岛斋堂岛海域完成海试。样机海试表明,自适应双向流叶片透平可有效完成自动换向适应双向流功能。

**关键词:** 潮流能; 透平叶片; 能源转换; 自适应; 无源

**中图分类号:** P743

**文献标识码:** A

## 0 引 言

海洋潮流能是海洋能研究的重点之一,相对于其他海洋能发电方式,水平轴潮流能发电技术成熟度较高,但还有很多关键技术难点亟待解决,适应流向问题就是其中之一<sup>[1]</sup>。水平轴潮流能发电适应流向技术是通过电机或液压方式改变叶片桨距来适应双向流,这种方式随单机容量的增大其弊端主要表现在:1)能量消耗大、响应速度慢;2)变桨机构长时间在海水中工作可靠性低、易漏水。欧洲开发潮流能较早,在潮流能开发方面做了一系列工作<sup>[2-4]</sup>,包括理论分析、实验研究和工程样机运行等,但上述问题未见具体较好的解决方案<sup>[5]</sup>。国内外相继提出利用复合材料的特性,改变传统叶片的气动布局<sup>[6]</sup>,以此来适应流体速度的变化,但增加了透平重量和转动惯量,且增加了成本。

本文研究无源自变距叶片以适应潮流流向和流速的改变。该自适应叶片能根据不同流速调整透平旋转过程中的桨距角;流向发生变化时,桨距角会随流向的变化发生变化;而且变桨动力完全来源于水动力,不消耗电能,简单有效。本文研究重点在于采用理论分析和实验验证比较分析前掠叶片、后掠叶片平、直叶片和水动力变距补偿翼对透

平启动性能和效率的影响,通过实际应用验证设计的可行性和可靠性。

## 1 原 理

小范围变桨( $\pm 20^\circ$ )适应双向流的叶片由于在 2 个方向都要有较高效率,因此不采用非对称翼型,设计叶片时采用对称翼型 NACA00 系列。后掠自适应叶片从叶根处开始后掠,后掠角取值  $5^\circ$  和  $10^\circ$  进行对比。为了对比试验效果设计前掠叶片(前掠角等于  $5^\circ$ )和普通直叶片。在叶根处有水动力变距补偿翼,通过改变水动力变距补偿翼的弦长研究水动力变距补偿翼对叶片变桨和透平效率的影响。

潮流发电机叶片水动力学分析采用叶素动量理论。叶素动量理论虽然忽略叶素之间的相互作用,但其计算精度和计算效率满足设计要求,很多风力机叶片和潮流发电机叶片设计和分析的软件都基于此理论(如 WT-Perf、GH-Bladed 等)。为了比较后掠叶片、直叶片、前掠叶片 3 种叶片的启动性能和效率,设计如图 1 所示的 3 种叶片。叶片长度 18 cm,图 1a 是后掠叶片,后掠角度  $5^\circ$ , $L_1$  是叶片截面翼型的焦点处,NACA 00 系列翼型的压力中心是弦长的  $1/4$  处,并且在叶根水动力补偿翼部位, $L_1$

收稿日期: 2018-06-27

基金项目: 海洋能专项资金(GHME2016YY03); 吉林省科技厅重点公关项目(20170204080GX); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(17KJB416004); 江苏科技大学博士科研启动经费(1172931701)

通信作者: 朱挽强(1980—), 男, 博士、讲师, 主要从事海洋能、风能开发利用方面的研究。zhuwq773@nenu.edu.cn

的位置在焦点线前面(1/5 弦长)的位置,这样更易实现叶片的变桨动作。 $L_2$  是叶片的旋转轴线。图 1b 是平直叶片,  $L_4$  也是叶片截面翼型的 1/5 弦长位置与  $L_1$  位置相同,也是叶片的旋转轴。图 1c 是前掠叶片,  $L_6$  是叶片截面翼型的焦点线,  $L_5$  是叶片的旋转轴线。

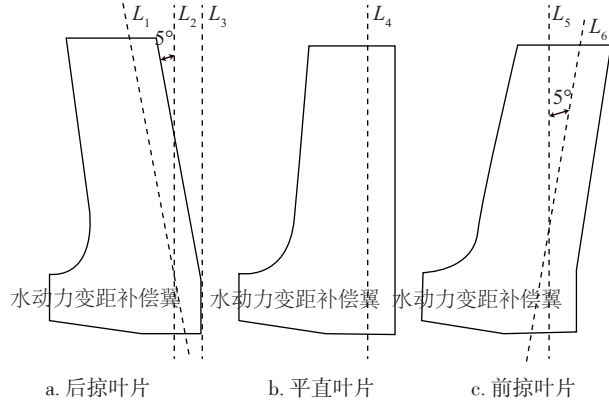


图 1 3 种叶片示意图

Fig. 1 Scheme of three types of blades

## 1.1 3 种叶片的变桨性能分析

### 1.1.1 3 种叶片变桨的水动力力矩分析

图 2 是后掠叶片、平直叶片和前掠叶片在变桨过程中所受水动力受力分析图。 $O_1$  是翼型旋转中心,  $O_2$  是翼型压力中心。图 2a 为后掠叶片的受力分析图。变桨时叶片受到的偏转力矩的力臂为:

$$d_1 = x \cdot R \sin z + \frac{1}{4} l_x \quad (1)$$

式中,  $x$  ——叶片截面所处位置, 即该位置占半径的百分比。根据叶素动量理论所受总的变桨力矩如式(2)所示:

$$Q_1 = \int_0^l d_1 \cdot dF dx = \int_0^l (x \cdot R \sin z + \frac{1}{4} l_x) dF dx \quad (2)$$

图 2b 为平直叶片的受力分析图。变桨时叶片受到的偏转力矩的力臂为:

$$d_2 = (\frac{1}{4} - \frac{1}{5}) l_x \quad (3)$$

变桨力矩:

$$Q_2 = \int_0^l d_2 \cdot dF dx \quad (4)$$

图 2c 为前掠叶片的受力分析图。变桨时叶片受到的偏转力矩的力臂为:

$$d_3 = \frac{l_x}{4} - (xR \sin z + \frac{l_x}{5}) \quad (5)$$

$$Q_3 = \int_0^l d_3 \cdot dF dx \quad (6)$$

三者安装角相等时, 各截面的  $dF$  几乎相等,  $d_1$  远大于  $d_3$ , 所以后掠叶片的变桨力矩远大于平直叶片。同理前掠叶片的力臂也小于平直叶片, 所以平直叶片的变桨力矩大于前掠叶片, 综上可知后掠叶片是最易变桨的叶片, 而且叶片的后掠角度越大越易实现变桨, 叶片的前掠角度越大越不易实现变桨。

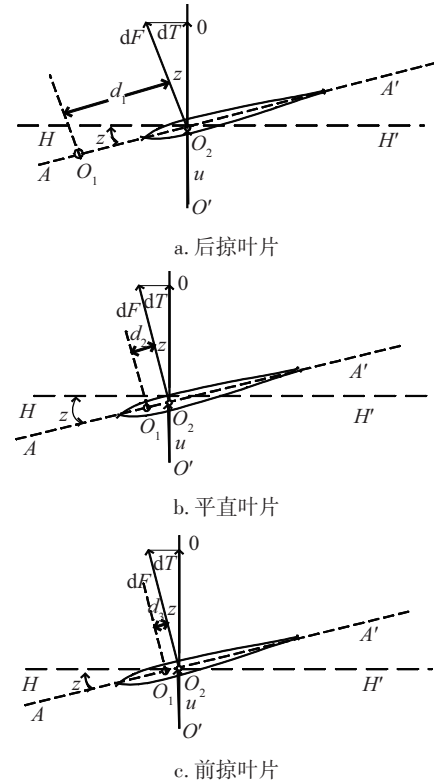


图 2 3 种叶片变桨时的受力

Fig. 2 Force of three kinds of blade when pitch angle is changed

### 1.1.2 叶片水动力变距补偿翼对叶片变距影响的分析

如图 1 所示, 水动力变距补偿翼位于叶片的根部。图 3 中的虚线翼型  $s'$  是补偿翼的翼型, 实线  $s$  是无补偿翼时翼型的弦长,  $O_1$  是旋转中心,  $O_2$ 、 $O_2'$  是翼型压力中心,  $d$  是无补偿翼时叶根所受偏转力矩的力臂,  $d'$  是有补偿翼时叶根所受偏转力矩的力臂,  $dF'$  是补偿翼所受升力。由图 3 可知, 叶片有水动力变距补偿翼时, 力臂  $d'$  远大于  $d$ 。所以叶片有水动力变距补偿翼时, 叶片更易实现变桨。另外叶片有补偿翼以后相当于实度变大, 透平也更易启动, 这些结论在后面的实验中均会得到验证。

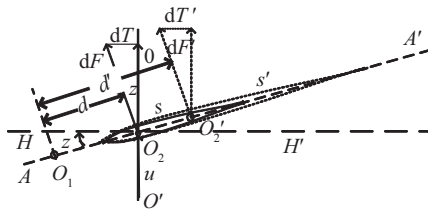


图3 水动力变距补偿翼受力分析

Fig. 3 Force analysis of hydraulic variable pitch compensating wing

### 1.1.3 叶片变桨的重力力矩分析

图4所示为后掠叶片的位置示意图。 $d_0$ 是旋转中心轴跟叶片重心位置的距离, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 是叶片旋转中心轴。由图4可知,由于重力作用产生的偏转力矩等于 $d_0 \cdot G \sin \theta \sin z$ 。叶片在竖直位置 $LL'$ 时,重力的方向与旋转中心轴的方向平行,重力矩为零。当叶片在竖直线左侧时,重力矩的作用跟水动力力矩的作用相同,重力矩有助于叶片实现变桨;当叶片在竖直线右侧时,重力矩的作用跟水动力力矩的作用相反,不利于叶片实现变桨。

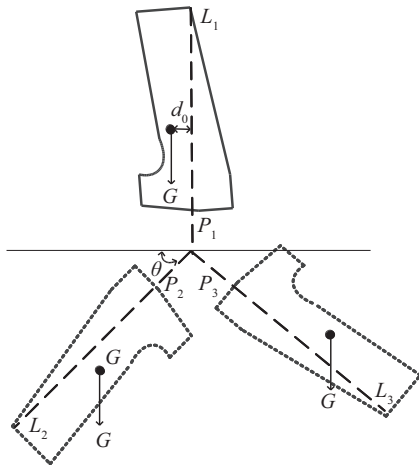


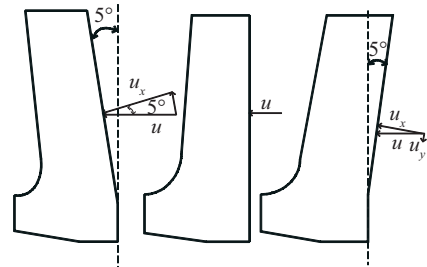
图4 叶片位置示意图

Fig. 4 Scheme of position of blades

综上,欲实现叶片顺利变桨,设计叶片时应合理设计叶片质量分布、控制好重心和旋转轴之间的距离。叶片实现变桨是重力和水动力合力作用的结果。后掠叶片是最易实现变桨的叶片类型。

### 1.2 3种叶片效率和推力系数分析

后掠或前掠叶片在运行过程中合速度的方向不垂直于叶片,实际有效速度低于平直叶片的输入速度。如图5所示为流体经过3种叶片时的速度分解。



a. 后掠叶片 b. 平直叶片 c. 前掠叶片

图5 3种叶片的速度分解图

Fig. 5 Triangle of velocity of three types of blade

流体经前掠叶片和后掠叶片时,流速可分解为垂直于前缘的分速度 $u_x$ 和平行于前缘的分速度 $u_y$ 。相比于平直叶片,后掠叶片和前掠叶片的有效分速度( $u_x$ )小于 $u$ ,所以产生升力较小,透平的效率会低于平直叶片。同样由于升力的减小,升力在透平旋转轴方向的分力也会减小,即透平的推力系数会减小。虽然叶片叶素微元的径向长度相应增加,在一定程度上增大了叶轮的有效功率,但影响较小。

由以上分析可知,叶片前掠角或后掠角的角度越大,叶片效率越低,推力系数越小。因此后掠叶片变桨容易,但付出的代价是效率降低。

### 1.3 叶片自适应流速变化原理分析

本文设计的叶片能适应双向流,叶片在运行过程中桨距角并非固定不变的,而是可根据流速的变化进行调整。

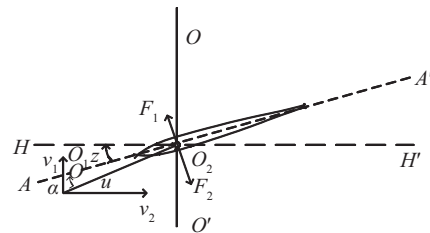


图6 运行时后掠叶片和平直叶片的速度和受力三角形

Fig. 6 Triangle of force and velocity of forward swept and orthogonal blade

图6中水平虚线 $HH'$ 为叶轮旋转平面,竖直线 $OO'$ 为叶轮的旋转轴, $AA'$ 为叶片的弦长方向。 $u$ 是水流速和转速的和速度; $v_1$ 是叶片表面轴向速度; $v_2$ 是叶片表面切向速度; $z$ 是叶片安装角; $\alpha$ 是叶片攻角; $F_1$ 是轴向速度作用于叶片产生的推力; $F_2$ 是切向速度作用于叶片产生的推力。叶片受到

的合力距为:

$$Q = (F_1 - F_2) \cdot d_1 \quad (7)$$

当  $F_1$  大于  $F_2$  时,叶片逆时针偏转,安装角增大,透平将叶片的最大安装角限制在  $15^\circ$ ;当  $F_1$  小于  $F_2$  时,叶片顺时针旋转,当  $F_1$  和  $F_2$  相等时,叶片停止旋转,这是一个动态平衡的过程。叶片受到的冲击力跟速度的平方和垂直面积成正比即:

$$F_1 \propto \int_0^1 v_1^2 l_{x1} R x dx \quad (8)$$

$$F_2 \propto \int_0^1 v_2^2 l_{x2} R x dx \quad (9)$$

$$l_{x1} = l_x \cos z \quad (10)$$

$$l_{x2} = l_x \sin z \quad (11)$$

式中,  $R$  ——半径;  $l_x$  ——该截面翼型的弦长;  $l_{x1}$  ——弦长在  $HH'$  方向分量;  $l_{x2}$  ——弦长在  $OO'$  方向分量。

水流速度变化后,叶片所受冲击力发生变化,安装角发生变化,安装角随水流速的变化而变化,透平的旋转速度发生变化,叶尖速比也会发生变化。综上分析得到结论:水动力矩和重力矩的合力距导致叶片变桨;叶片后掠利于叶片的变桨,不利于透平的启动和工作效率;叶片前掠既不利于叶片的变桨也不利于透平的启动和工作效率。

## 2 实验验证

为了验证理论分析,用小尺寸模型进行实验验证。实验水槽尺寸较小,测试部分的深度×长度×宽度为  $43.0 \text{ cm} \times 40.0 \text{ cm} \times 55.2 \text{ cm}$ 。水槽水流速范围在  $0 \sim 0.5 \text{ m/s}$  之间,可通过调整推进器的转速调整水流速度。试验用发电机内阻  $39 \Omega$ ,有 11 对磁极,是单相爪极交流发电机,透平有 2 个叶片。负载是阻值  $39 \Omega$  的纯电阻负载。叶片由激光切割机加工而成。

叶片 A 弦长分布函数:

$$l(x) = \begin{cases} 1204x + 34, & 0 < x < 0.0532 \\ 100, & 0.0532 < x < 0.2128 \\ 45 + \sqrt{3025 - x^2}, & 0.2128 < x < 0.3085 \\ 45, & 0.3085 < x < 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $l$  ——弦长, mm, 其中  $l(x) = 100 \text{ mm}$  的部分是水动力补偿翼弦长。

试验时共制作 11 组叶片:组 0 标记为 A、B;组 1 标记为 A1、B1;组 2 标记为 A2、B2,以此类推,组 10 标记为 A10、B10。同组叶片的叶片弦长分布

函数除水动力补偿翼部分,其他均相同。水动力补偿翼部分的弦长分布规律和叶片名称如表 1 所示,叶片和透平照片如图 7 所示。

表 1 叶片名称和叶片类型

Table 1 Names and types of blades

组号	叶片名称	叶片类型	掠角/ (°)	水动力补偿 翼弦长/mm
0	A、B	平直	0	100
1	A1、B1	平直	0	80
2	A2、B2	后掠	5	100
3	A3、B3	后掠	5	90
4	A4、B4	后掠	5	80
5	A5、B5	后掠	5	无
6	A6、B6	后掠	10	100
7	A7、B7	后掠	10	90
8	A8、B8	后掠	10	80
9	A9、B9	后掠	10	无
10	A10、B10	前掠	5	100



图 7 透平照片示意图

Fig. 7 Photo of turbine sketch map

## 3 实验结果分析

### 3.1 叶片变桨性能测试

叶片变桨时,水流速很小,超出试验室所用水流速计的最小量程,所以变桨时的流速以水槽水流推进器的调频器的频率来表示。调频范围  $0 \sim 50 \text{ Hz}$ 。为分析 3 种不同类型叶片的变桨性能,比较平直叶片 A、后掠叶片 A2、前掠叶片 A10 完成变桨动作时的流速。为分析后掠角大小对叶片变桨性能的影响,比较后掠叶片 A2、A6 完成变桨动作时的流速。



为分析水动力变距补偿翼对变桨性能的影响,比较水动力补偿翼弦长不同的同类型叶片 A2、A4、A5 这 3 种叶片完成变桨动作时的流速,结果如图 8 所示。

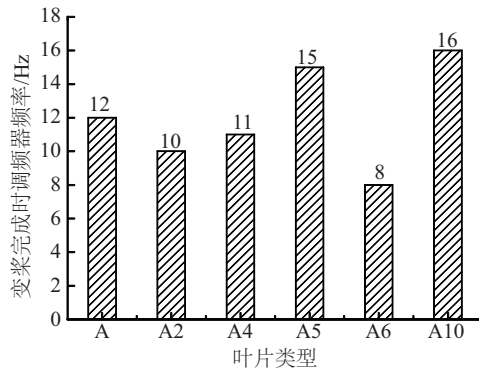


图8 叶片类型和完成变桨的调频器频率

Fig. 8 Types of blade and frequency of modulator

A、A2、A10 这 3 种叶片的水动力变距补偿翼的弦长均为 100 mm,前掠角和后掠角均为 5°,通过比较可知,3 种叶片里面后掠叶片的变桨流速最低,变桨能力最强;前掠叶片的变桨流速最高,变桨能力最弱。A2、A6 这 2 种叶片的水动力变距补偿翼弦长均为 100 mm,叶片 A2 的后掠角 5°,叶片 A6 的后掠角 10°。比较可知,后掠角越大,透平越易变桨,变桨流速越低。A2、A4、A5 这 3 种叶片的后掠角均为 5°,A2 的水动力补偿翼的弦长 100 mm,A4 的水动力变距补偿翼的弦长 80 mm,A5 无水动力变距补偿翼。比较可知,水动力变距补偿翼的弦长越大,透平越易变桨。

综上所述:后掠叶片易变桨,后掠角越大越易变桨,水动力变距补偿翼弦长越大,越易变桨。

### 3.2 叶片启动性能测试

中国潮流流速很低,所以透平的启动能力对潮流能发电机非常重要。为了比较各参数对叶片启动性能的影响,将叶片分成几组进行比较,结果如图 9 所示。比较 A、A2、A10 这 3 种叶片可知,直叶片的启动流速最低,启动能力最强;后掠叶片和前掠叶片的启动流速相当,启动能力较弱。比较 A2、A6 可知,后掠角越大,透平越不易于启动。比较 A2、A4、A5 可知,水动力变距补偿翼的弦长越大,透平越易启动,其中 A5 是最难启动的。

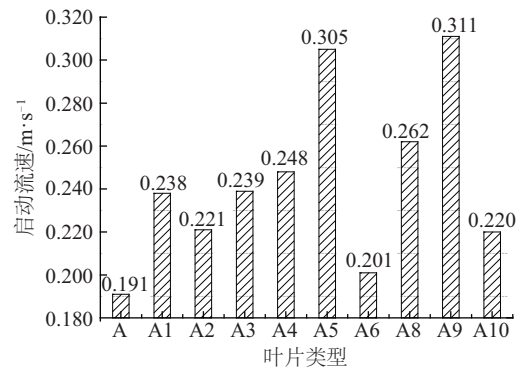


图9 叶片类型和叶片启动流速

Fig. 9 Types of blade and its startup speed

综上所述:直叶片最易启动,前掠叶片和后掠叶片次之;后掠角越大越不易启动,水动力变距补偿翼弦长越大,越易启动。

### 3.3 叶片效率测试

由于测试水槽尺寸较小,流速较低,因此雷诺数较低,因此本文仅对效率做定性研究,实际装置效率远高于试验模型。透平效率以流速为 0.319 m/s、调频器频率为 29 Hz 时进行测试,透平半径为 184 mm,流经透平的总能量为 1.725 W。负载是 39 Ω 的纯电阻,测试输出电压得到输出功率,进而得到系统总效率。由于流速较低,叶片升阻较小,而且所使用电机效率较低,所以得到的发电效率均较低,结果如图 10 所示。

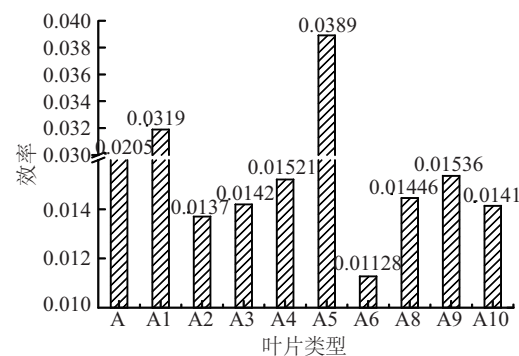


图10 叶片类型和透平效率

Fig. 10 Types of blade and its power efficiency

比较 A、A2、A10 这 3 种叶片可知,直叶片的效率最高;后掠叶片和前掠叶片效率相当,均低于平直叶片。比较 A2、A6 可知,后掠角越大,透平的效率越低。比较 A2、A4、A5 可知,水动力变距补偿翼的弦长越大,透平效率越低。

综上可得:叶片有后掠角或前掠角均会降低透平效率,角度越大效率下降越多;水动力变距补偿翼会降低透平效率。

### 3.4 实验总结分析

由实验结果可得:叶片后掠可帮助叶片顺利实现变桨,但效率会降低;水动力变距补偿翼对叶片的变桨启动有很大作用但不利于透平的出力;叶片后掠角选择恰当即使无水动力变距补偿翼,也可实现叶片顺利变桨,而且透平效率较高。实验中也发现叶片在旋转过程中桨距角会自动发生变化,适应流速的变化。虽然实验过程无法测量桨距角的变化,但在实验上验证了理论分析的正确性和这种设计的可行性。

本文设计的具有水动力变距补偿翼叶片应用于国家海洋可再生能源专项资金支持项目“15 kW 自变距水平轴潮流能发电试验装置”上(如图 11 所示),并在青岛斋堂岛水道进行海上实验,装置实现流速为 0.7 m/s 时发电效率为 28.6%(岸上用户终端电能测试,额定流速 2 m/s 时效率更高)。实验结果表明,自变距叶片可很好地适应潮流能双向流的改变,其发电效率也达到预期指标,并通过国家海洋局的验收。



图 11 15 kW 自变距水平轴潮流能发电装置海上试验

Fig. 11 Marine test of 15 kW generator with adaptive blade for horizontal axis tidal current turbine

## 4 结 论

本文通过理论分析和模型实验研究水平轴潮流发电机透平平直叶片、后掠叶片、前掠叶片、水动力变距补偿翼在自适应流向流速变化过程中的特性。叶片前掠既不利于叶片变桨、启动,也降低了透平的效率。叶片后掠利于叶片实现变桨,但降低了透平的效率和启动能力。平直叶片的变桨性能不及其他 2 种叶片,但效率最高。水动力变距补偿

翼利于叶片实现变桨和启动,但降低了透平效率。

综上,为适应中国潮流流速低的现状和适应潮流流向的情况,这种新型自适应流向的潮流能透平叶片通过实海况试验验证了其可行性,本文研究成果将用于后期百千瓦级潮流发电站的研制。

### [参考文献]

- [1] Wu Baigong, Zhang Xiao, Chen Jianmei, et al. Design of high-efficient and universally applicable blades of tidal stream turbine[J]. Energy, 2013, 60: 187—194.
- [2] Batten W M J, Bahaj A S, Molland A F, et al. Experimentally validated numerical method for the hydrodynamic design of horizontal axis tidal turbines[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(7): 1013—1020.
- [3] 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.
- [4] Bahaj A S. Generating electricity from the oceans[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(7): 3399—3416.
- [5] Wang Shujie, Yuan Peng, Li Dong, et al. An overview of ocean renewable energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 91—111.
- [6] 康传明, 张卫民. 大型后掠自适应风力机叶片的气动扭角设计优化[J]. 空气动力学报, 2011, 29(4): 518—521.
- [6] Kang Chuanming, Zhang Weimin. The twist angle design and optimization of large sweep twist blade[J]. Aca Aerodynamic Sinica, 2011, 29(4): 518—521.
- [7] 米 康, 王 旭, 刘文法. 前掠角对前掠翼布局气动性能的影响[J]. 导弹与制导学报, 2009, 29(4): 179—181.
- [7] Mi Kang, Wang Xu, Liu Wenfa. The influence of forward-swept angle on the longitudinal characteristics of aerodynamic configuration with forward-swept wing[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missile and Guidance, 2009, 29(4): 179—181.
- [8] 王 旭, 黄 萌, 任智静, 等. 前掠翼与平直翼布局气动特性的比较分析[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(4): 1—3.
- [8] Wang Xu, Huang Meng, Ren Zhijing, et al. Comparison and analysis on the aerodynamic characteristics of forward swept and orthogonal wing configurations[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2011, 12(4): 1—3.

## DESIGN AND RESEARCH OF PASSIVE ADAPTIVE BIDIRECTIONAL FLOW BLADE FOR HORIZONTAL AXIS TIDAL CURRENT ENERGY

Chen Jianmei<sup>1</sup>, Wu Baigong<sup>2</sup>, Zhu Wanqiang<sup>1</sup>, Xu Mingqi<sup>1</sup>, Dong Yongjun<sup>1</sup>, Zhang Xueming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Energy Development and Application Innovation of Jilin Province,

Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Ocean Equipment Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Studying adaptive bidirectional new blade with passive self-changing pitch, the analysis and verification of the variable pitch principle of forward swept blades, swept blades and straight blades, the change principle of adaptive flow direction and flow rate are carried out through theory and experiment, the effect of hydrodynamic variable distance compensation wing is analyzed. The designed self-changing pitch blade can adjust the tip speed ratio in a small range after reasonable adjustment of the sweep angle and the spindle position. The correctness and practicability of this design are verified by theoretical analysis and model test research. On this basis, the design is applied to the 15 kW tidal current energy prototype and the sea test is completed in the Zhaitang island sea area of Qingdao. The prototype sea test shows that the adaptive bidirectional flow vane turbine can effectively complete the automatic commutation to adapt to the bidirectional flow function.

**Keywords:** tidal current energy; turbine blade; energy conversion; adaptive; passive