

DOI: 10.7652/xjtuxb201311004

水下航行器垂直轴海流发电装置 叶轮特性的数值仿真

田文龙, 宋保维, 毛昭勇, 刘郑国

(西北工业大学航海学院, 710072, 西安)

摘要: 为了探索、解决水下航行器能源补给问题,设计了一种用于水下航行器的垂直轴海流发电装置,并利用二维非定常流体力学计算研究了不同尖速比下叶片截面翼型、叶片弦长、叶轮阻塞度等结构参数对叶轮受力和功率输出特性的影响。计算时基于了雷诺时均 N-S 方程,湍流模型采用重整化群的 $k-\epsilon$ 模型,计算域网格用 GAMBIT 软件将其划分成静止域和旋转域两部分,并通过滑移网格技术实现了静止域和旋转域的相对转动。计算结果表明:叶片厚度增加,叶轮在较小尖速比下可获得更高的扭矩峰值和捕获功率峰值;叶轮阻塞度对叶轮输出影响显著;采用 NACA0015 翼型的叶轮,当水流速为 0.5 m/s、尖速比为 2、叶轮阻塞度为 0.266 5、叶片弦长为 150 mm、叶片展长为 1 m 时,最大平均捕获功率约为 25 W。该结果可为水下航行器发电装置的受力和功率输出特性研究提供参考。

关键词: 水下航行器;海流发电装置;计算流体力学;滑移网格

中图分类号: TK730.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0019-06

Numerical Analysis on Impeller Behavior of Vertical Axis Water Turbine for Underwater Vehicles

TIAN Wenlong, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, LIU Zhengguo

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to supply energy to autonomous underwater vehicles (AUVs), a small-scale vertical axis water turbine (VAWT) was designed. The influence of structural parameters including the foil section profile, the foil cord length and the block ratio on the turbine performance at different tip-speed-ratios (TSRs) was investigated with the two-dimensional transient computational fluid dynamics (CFD) method. In the numerical simulation, the time-averaged Reynolds Navier-Stokes equation and the RNG $k-\epsilon$ turbulence model are adopted. The computation domain is divided into a stationary subdomain and a rotating subdomain, and they are connected by a sliding mesh method. The results show that the higher torque peak and capture power peak can be achieved at the smaller TSRs when the blade thickness is larger. The block ratio has significant influence on the impeller output. The turbine with three unit-length NACA0015 foils can generate a maximum averaged power of 25 W at a water velocity of 0.5 m/s and other given parameters.

Keywords: underwater vehicle; water turbine; computational fluid dynamics; moving mesh

从海洋中获得能源补给以提高水下航行器的作业范围是当前国内外水下航行器领域的一个研究热点,目前已经成功应用于水下航行器的海洋能源包括温差能^[1]和太阳能^[2],然而温差能密度较低,不能满足水下定点监测、定深航行等要求,而太阳能随天气的变化波动性较大。

海流能是海水平稳且有规律流动的动能,对于水下航行器能源补给,海流能特点包括:有规律可预测,几乎不受天气的影响;能量密度大;发电装置置于海面以下,受风浪影响小。

海流能发电装置的原理与风力发电机相似。根据叶轮轴线和海流方向,海流发电装置分为水平轴式叶轮^[3]和垂直轴式叶轮。垂直轴式叶轮的轴线与来流方向垂直,结构简单,可以捕获任意方向的海流能量^[4]。

目前研究较多的垂直轴式叶轮有 Darrieus 和 Savonius 两种。Hwang 等对 Darrieus 叶轮变桨距结构进行了运行规律和发电性能方面的研究^[5];Lain 等利用计算流体力学(CFD)技术对 Darrieus 叶轮输出特性及叶片失速进行了二维数值仿真^[6-7];Li 等考虑了三维影响,通过建立涡模型对 Darrieus 叶轮性能进行了准确预计^[8];Shiono 等对螺旋式 Darrieus 叶轮进行了实验研究^[9];Ponta 等提出了轨道式 Darrieus 叶轮的概念^[10];Saha 等通过水洞实验对 Savonius 叶轮的结构参数进行了优化设计^[11];Golecha 等研究了导流板对 Savonius 叶轮发电性能的影响^[12];Mohamed 等对导流板进行了优化设计^[13]。

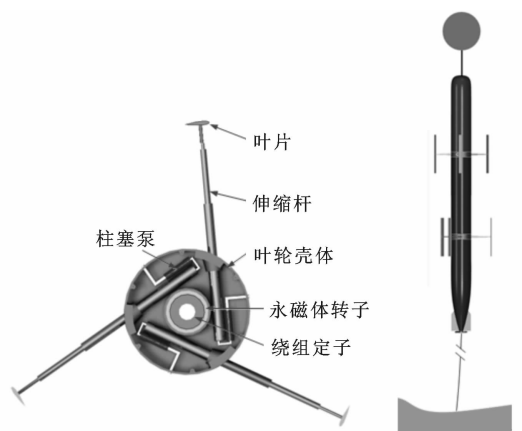
其他形式的垂直轴式叶轮还包括 Banki 型^[14]、Zephyr 型^[15]、Giromill 型^[16]、Hunter 型^[17]。

本文设计了一种用于水下航行器的垂直轴海流发电装置,重点对发电装置叶轮部分进行了二维非定常数值模拟,研究了不同尖速比 r_{TSR} 下翼型、叶片弦长 c 、叶轮阻塞度 δ 等结构参数对叶轮输出特性的影响,分析了工作环境下速度场的基本特点,以期在海流发电装置的优化设计提供理论依据和必要数据。

1 垂直轴海流发电装置

水下航行器的垂直轴海流发电装置主要由多个叶片、伸缩杆、柱塞泵、永磁发电机和叶轮壳体组成,如图 1a 所示。叶片固定安装在伸缩杆末端,采用截面为机翼翼型的直叶片,主要作用是捕获海水流动的动能。永磁转子直接嵌入叶轮壳体,绕组定子与

航行器主轴固定相连。



(a) 内部结构 (b) 布放示意图
图 1 垂直轴海流发电装置

该装置可展开、收缩,展开后叶片形成类似 Darrieus 型的叶轮,收缩后叶片贴附在航行器壳体表面,工作原理如下。

(1)航行器需要充电时,航行器头部放出充气浮体,尾部抛下锚链,将航行器锚系在垂直方向(见图 1b),随后发电装置启动柱塞泵,抽取海水并高压注入到多节伸缩杆中,使得伸缩杆展开;伸缩杆展开后,在海流的作用下叶轮受到流体动力矩作用,叶片、多节伸缩杆及叶轮壳体绕航行器纵轴旋转,带动嵌入叶轮壳体的永磁体转子转动,从而产生感应电动势。

(2)充电完成后,航行器收起锚链和浮体,柱塞泵反向工作,抽取伸缩杆中的海水并排入海中,伸缩杆在水压的作用下自动收回。

本文设计的海流发电装置的叶轮与 Darrieus 型叶轮的主要区别在于,航行器壳体处于叶片几何旋转中心,对叶片所在流场有较大扰动,因此有必要分析叶轮在壳体扰流下的输出特性。

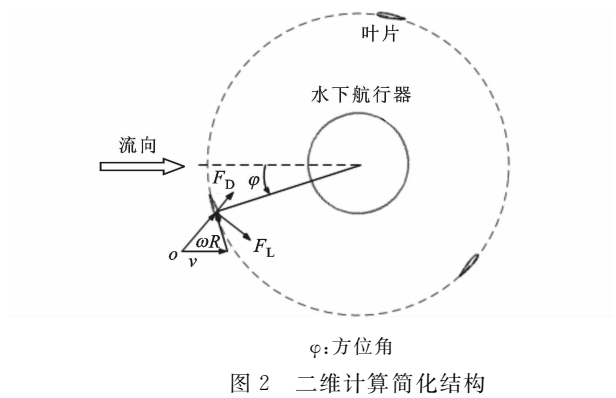
2 计算模型

2.1 物理模型

由于采用直叶片,可以忽略叶片展长方向的影响,所以选定单位展长(1 m)进行二维数值仿真分析。在 CFD 计算时,为降低计算量而不影响计算精度,物理模型中忽略了与叶轮水动力无关的部件;因柱塞泵、永磁转子和定子安装在壳体内部,故忽略了其对叶轮水动力的影响;因伸缩杆的直径远小于叶片长度,计算时忽略其影响,但考虑叶片和固定的航行器壳体的影响。

水下航行器垂直轴海流发电装置的二维计算简

化结构如图 2 所示。当叶轮绕中心轴以角速度 ω 旋转时,叶片同时受到了升力 F_L 和阻力 F_D 作用,而一般翼型的升阻比较大,升力 F_L 在切线方向的分力大于阻力 F_D 的分力,两分力的合力是推动叶轮转动的驱动力。



2.2 计算域及边界条件

计算域由外部静止域、内部静止域和旋转域组成,外部静止域与内部静止域之间由旋转域隔开,叶片包裹于旋转域内,如图 3 所示。计算域由半圆和矩形区域组成,半圆域的半径是叶轮直径 D 的 3 倍,发电装置下游的长度和宽度均是叶轮直径的 6 倍。

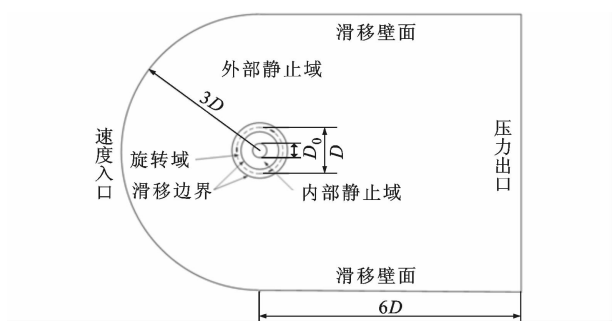


图 3 计算域和边界条件

计算域的边界条件:旋转域与内外 2 个静止域的交界为滑移边界,入口边界为速度入口,出口边界为压力出口,上下边界为滑移壁面,叶片、水下航行器壁面均为无滑移壁面,旋转域具有特定的旋转速度。

2.3 网格生成、控制方程及湍流模型

利用 GAMBIT 软件进行计算域网格划分,2 个静止域采用结构化网格,旋转域采用非结构化网格,在叶片上设置边界层并进行局部加密,如图 4 所示。整体网格数约为 14 万。

计算基于 RNG $k-\epsilon$ 模型。流场的控制方程包括连续性方程和动量方程,即

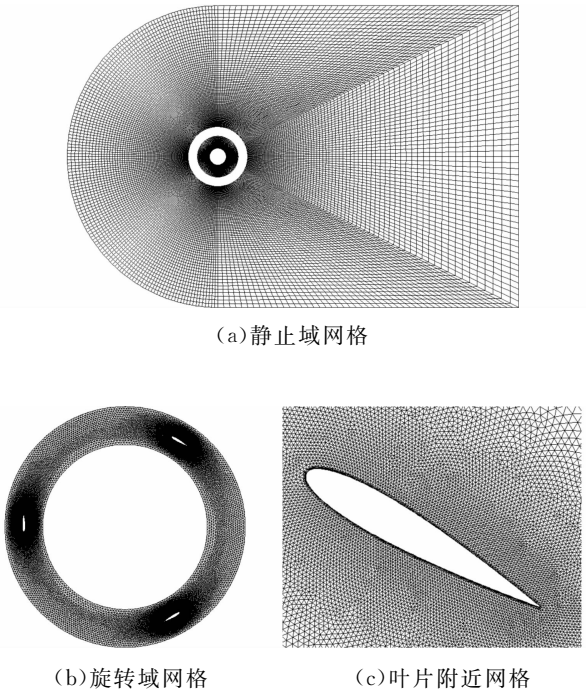


图 4 网格划分

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot \mathbf{v} = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) + \rho(2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{F}$$

每种工况下计算 5 个旋转周期,每个旋转周期设定 180 个时间步,每个时间步内旋转域转动 2° 并且迭代 100 次。残差收敛标准为 1×10^{-5} ,计算格式采用二阶迎风格式。

3 计算结果分析

为了消除尺寸影响、便于分析,定义如下归一化系数。

尖速比

$$r_{TSR} = \frac{\omega D}{2v_\infty}$$

阻塞度

$$\delta = \frac{D_0}{D}$$

式中: v_∞ 为来流速度; D_0 为水下航行器外壁直径 (533 mm)。尖速比是叶尖旋转速度与来流速度之比,用来表征叶轮的相对旋转速度。阻塞度是水下航行器外壁直径与叶轮直径之比,用来表征航行器壳体对叶轮内部的阻塞程度。

3.1 数值方法验证

为验证本文数值方法的有效性,首先对单叶片

无壳体($\delta=0$)的叶轮进行了数值仿真验证,求解了一个周期内叶片上所受力矩随方位角 φ 的变化,如图 5 所示。在 Fluent 软件中的 Monitor 窗口可直接读取并存储叶片相对叶轮旋转中心的力矩,仿真条件见表 1。

由图 5 可以看到,本文计算的力矩变化曲线与 Sandia 国家实验室 Oler 等仿真结果和拖曳水池实验结果^[17]十分吻合,即变化趋势一致,但总体上仿真结果高于实验结果,这可能是采用二维计算时未考虑壁面影响和三维叶片叶尖损失,以及实验流速较低、力矩相对测量误差较大的缘故。

表 1 NACA0015 翼型的仿真条件

参数	数值
叶片数	1
c/mm	152.4
D/m	1.22
$v_\infty/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.183
r_{TSR}	2.5
δ	0

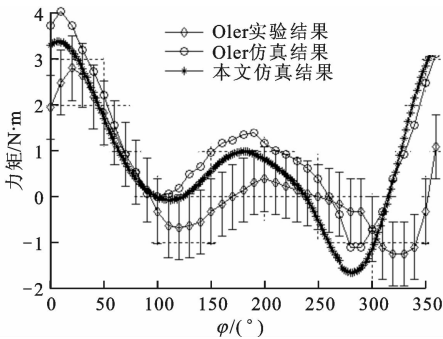


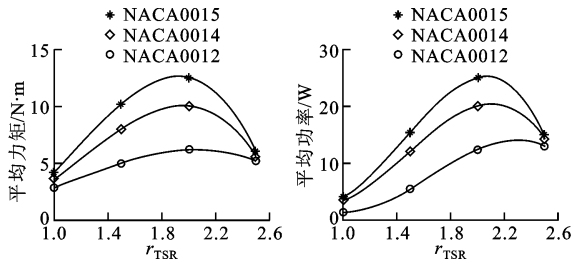
图 5 本文仿真与 Oler 等仿真和拖曳水池实验结果对比

3.2 翼型对发电装置性能的影响

3 种常用翼型 NACA0012、NACA0014、NACA0015 在 $v_\infty=0.5\text{ m/s}$ 、 $\delta=0.266\ 5$ 、 $c=150\text{ mm}$ 下的叶轮输出性能如图 6 所示,其中叶轮平均力矩为一个周期内 3 枚叶片平均力矩的总和,叶轮平均功率为叶轮平均力矩与叶轮转动角速度之积。

由图 6a 可以看出:相同尖速比下,叶片越厚,叶轮平均力矩越大;随着尖速比的增加,叶轮平均力矩呈现出先增加后减小的趋势;随着叶片厚度增加,平均力矩和平均功率曲线就越陡峭,叶轮只能在较小的尖速比范围内平稳发电。

由图 6b 可以看出:叶轮功率峰值对应的尖速比



(a) 平均力矩 (b) 平均功率

图 6 不同翼型下叶轮的输出性能

略高于力矩峰值对应的尖速比;NACA0015 翼型叶轮在尖速比为 2 时的平均功率最大,约为 25 W。

$r_{\text{TSR}}=2$ 时一个周期内单个叶片所受到的力矩随方位角的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出,叶片厚度越大,周期内取得的最大正力矩越大,同时最小负力矩越小。

对比图 5 和图 7 可以发现:在没有航行器壳体的情况下,一个周期内叶轮力矩存在 2 个极大值,对应于 $\varphi=0^\circ, 180^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 时力矩最大;叶轮力矩存在 2 个极小值,对应于 $\varphi=90^\circ, 270^\circ$, $\varphi=90^\circ$ 时力矩约为 0, $\varphi=270^\circ$ 时力矩为最小。从对比中还发现:有航行器壳体的情况下,叶轮力矩在 $\varphi=0^\circ$ 时取得最大值,而在 $\varphi=180^\circ$ 时为极小值,这是由于 $\varphi=180^\circ$ 时,叶片进入壳体下游湍流区域后产生的升力较小的缘故;受壳体影响,叶轮力矩在 $\varphi=50^\circ$ 左右进入负值区域;叶片力矩在 $\varphi=90^\circ, 270^\circ$ 时取得极小值。

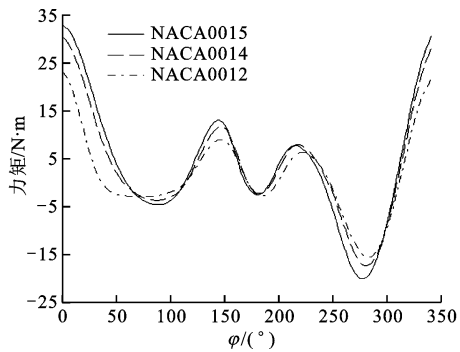


图 7 不同翼型叶片一个周期内的力矩变化

3.3 阻塞度对发电装置性能的影响

$v_\infty=0.5\text{ m/s}$ 、 $c=150\text{ mm}$ 时 NACA0015 翼型叶轮在 $\delta=0.333\ 1, 0.266\ 5$ 下的输出性能如图 8 所示。

由图 8 可以看出:阻塞度越小,叶轮的功率峰值和平均功率峰值越大,平均力矩和平均功率峰值对应的尖速比越大;阻塞度越大,平均力矩和平均

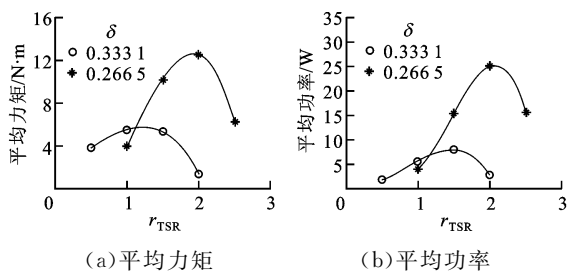


图 8 不同阻塞度下叶轮的输出性能

功率曲线变化越平缓。这样,发电装置可在较大的尖速比范围内平稳发电。

由以上分析可知,阻塞度是影响叶轮输出特性的重要参数。大阻塞度叶轮适用于转速低、尖速比变化大的工况,小阻塞度叶轮适用于转速高、尖速比稳定、输出功率大的工况。

3.4 弦长对发电装置性能的影响

$v_{\infty}=0.5\text{ m/s}$ 、 $\delta=0.266\ 5$ 时 NACA0015 翼型叶轮在不同弦长下的输出性能如图 9 所示。

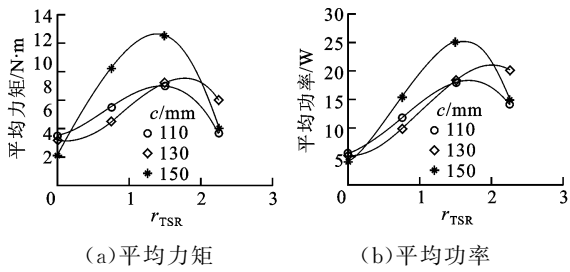


图 9 不同弦长下叶轮的输出性能

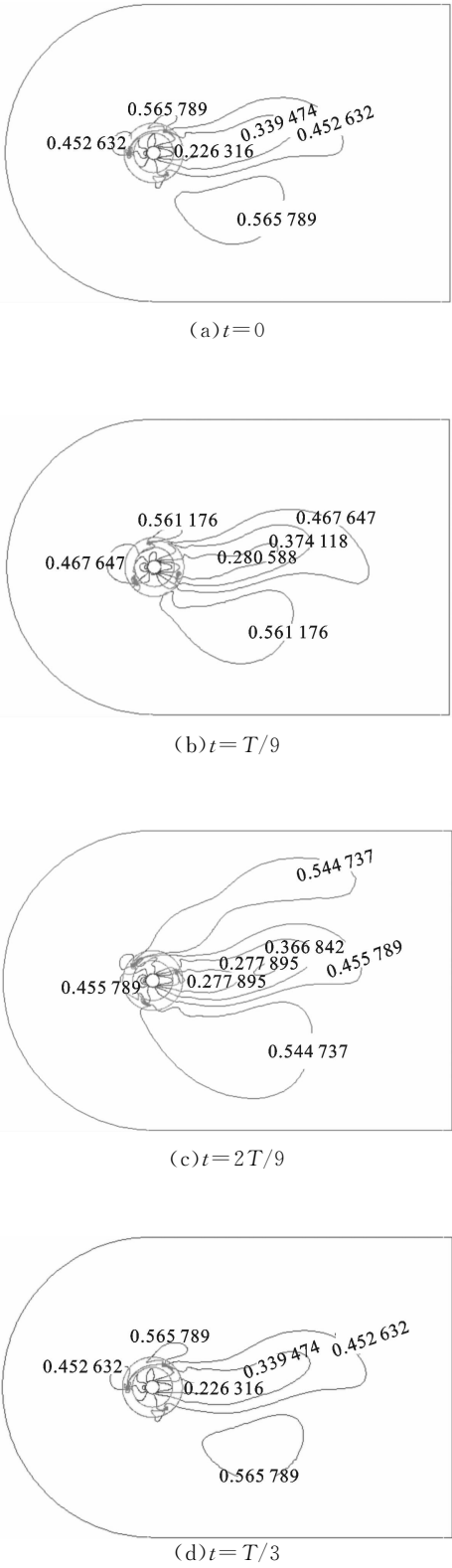
由图 9 可以看出,叶片弦长越长,叶轮的平均力矩峰值和平均功率峰值越大,平均力矩和平均功率峰值对应的尖速比先增加后减小,平均功率峰值对应的尖速比略高于平均力矩峰值对应的尖速比。 $c=150\text{ mm}$ 的叶轮在 $r_{TSR}=2$ 附近的力矩和功率特性明显优于 $c=130,110\text{ mm}$ 的叶轮,当 $2.3<r_{TSR}<1$ 时, $c=130,110\text{ mm}$ 的力矩特性和功率特性不如 $r_{TSR}=2$ 的情况。

3.5 速度场分析

$v_{\infty}=0.5\text{ m/s}$ 、 $\delta=0.266\ 5$ 、 $c=150\text{ mm}$ 时 NACA0015 翼型叶轮在 $1/3$ 旋转周期内的流场速度等值线如图 10 所示。

由图 10 可以看出,叶轮在 $1/3$ 旋转周期内,流场出现一次周期性变化,这是发电装置中心对称安装的 3 枚叶片对流场产生周期性扰动的缘故。由图 10 还可以看出,叶轮内部流场变化剧烈,海水在经过叶轮后流动速度降低,而在叶轮下风方向的 $5D$

处之后流速恢复至初始状态,表明叶轮对流场的扰动限定在下风方向宽约 $5D$ 、长约 $5D$ 的范围内。



单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 10 不同时刻下流场速度分布

4 结 论

本文提出了一种用于水下航行器的垂直轴海流发电装置,并利用滑移网格技术对叶轮进行了二维非定常数值模拟,研究了不同尖速比下翼型、叶片弦长、叶轮阻塞度等结构参数对叶轮发电性能的影响,结果如下。

(1)随着尖速比的增加,叶轮扭矩和捕获功率呈现出先增加后减小的趋势;叶片厚度增加,叶轮在较小尖速比下获得的扭矩峰值和功率峰值更高;随着叶片弦长的增加,叶轮的力矩峰值和功率峰值增大,力矩峰值和功率峰值对应的尖速比先增加后减小。

(2)大阻塞度发电装置适用于转速低、尖速比变化大的工况,小阻塞度发电装置适用于转速高、尖速比稳定、输出功率大的工况;采用 NACA0015 翼型叶轮, $r_{\text{TSR}}=2$, $\delta=0.2665$, $c=150$ mm 时最大功率约为 25 W。

本文数值计算时假设叶轮绕航行器纵轴定轴转动,而实际中,受流体作用力影响,航行器会产生复杂的空间运动,未来工作中需要考虑航行器与流体之间的相互影响。

参考文献:

- [1] GRAVER J. Underwater gliders: dynamics, control and design [D]. Princeton, NJ, USA: Princeton University, 2005.
- [2] BLIDBERG D, AGEEV M, JALLBERT J. Some design considerations for a solar powered AUV: energy management and its impact on operational characteristics [J]. Unmanned Systems, 1997, 15(4): 26-31.
- [3] MYERS L, BAHAJ A. Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(2/3): 218-227.
- [4] YANG B, LAWN C. Fluid dynamic performance of a vertical axis turbine for tidal currents [J]. Renewable Energy, 2011, 36(12): 3355-3366.
- [5] HWANG I, LEE Y, KIM S. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1532-1540.
- [6] LAIN S, OSORIO C. Simulation and evaluation of a straight-bladed Darrieus-type cross flow marine turbine [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2010, 69(12): 906-912.
- [7] NOBILE R, VAHDATI M, BARLOW J, et al. Dy-

namical stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study [C/OL]// Proceedings of the World Renewable Energy Congress. [2012-12-10]. http://www.reading.ac.uk/web/FILES/tsbe/nobile_tsbe_conf_2011.pdf

- [8] LI Y, CALISAL S. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine [J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2325-2334.
- [9] SHIONO M, SUZUKI K, KIHIO S. Output characteristics of Darrieus water turbine with helical blades for tidal current generation [C]// Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino, CA, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 859-864.
- [10] PONTA F, SEMINARA J, OTERO A. On the aerodynamics of variable-geometry oval-trajectory Darrieus wind turbines [J]. Renewable Energy, 2007, 32(1): 35-36.
- [11] SAHA U, THOTLA S, MAITY D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8/9): 1359-1375.
- [12] GOLECHA K, ELDHO T, PRABHU S. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine [J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3207-3217.
- [13] MOHAMED M, JANIGA G, PAP E, et al. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade [J]. Renewable Energy, 2010, 35(11): 2618-2626.
- [14] DRAGOMIRESCU A. Performance assessment of a small wind turbine with cross flow runner by numerical simulations [J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 957-965.
- [15] KOPE K, RODRIGUES V, DOYLE R, et al. Effects of stator vanes on power coefficients of a Zephyr vertical axis wind turbine [J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 1043-1051.
- [16] EI-SAMANOUDY M, GHORAB A, YOUSSEF S H. Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2010, 1(1): 85-95.
- [17] OLER J, STRICKLAND J, IM B, et al. Dynamic stall regulation of the Darrieus turbine, SAND83-7029 UC-261 [R]. Livermore, CA, USA: Sandia Corporation, 1983.

(编辑 苗凌)