

海流发电用翼型的水动力学模拟

张玉良¹, 朱祖超^{1,2}, 崔宝玲², 李 昶², 金英子²

(1. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 浙江理工大学流体传输及应用实验室, 杭州 310018)

摘 要: 为研究海流各个流动参数同时对水翼水动力学性能的影响,根据海流随机波动特点,选取海流的攻角、雷诺数和湍流强度 3 个因素,每个因素选取 4 个水平,进行了 $L_{16}(4^3)$ 正交试验设计,对 16 种方案下的海流发电用翼型 NACA63440 的水动力学性能进行了定常流动的数值模拟,分析海流的各个流动参数对水翼水动力学特性的影响规律。数值模拟结果表明:海流参数对水翼升阻系数影响的大小依次是湍流度,攻角,雷诺数;其中湍流强度和攻角对升阻系数影响较为明显,而雷诺数对其影响较小;增加攻角可有效提高升阻比,但存在一极值,超过该极值,水翼将发生失速现象;增大雷诺数可适度提高水翼升阻比;水翼的前半部分是产生升力的主体区域,且在前缘上部存在最易空化的区域。研究结果为进一步研究水翼的水动力特性提供了有益的参考。

关键词: 水翼; 正交试验; 数值模拟; 性能预测

中图分类号: TK79 **文献标识码:** A

0 引 言

海流能和波浪能、潮汐能一样,都是具有巨大开发潜力的新型可再生能源。目前海流能资源最主要的开发方式就是利用海流冲击水下风车旋转发电。海流的湍流度更大,且具有随机波动特点,加之绕流翼型时,可能会产生不同于风力机的汽蚀、空化等现象。因此,对水下风车翼型的水动力学研究是叶片设计中非常重要的环节。

目前水下风车所采用的翼型基本上与风力机相同。对水下翼型(简称水翼)动力特性研究并不多见^[1-3],而对其空化特性研究文献报道较多^[4-7]。以上研究大都遵循一种参数变化,而其它参数不变这一原则。但在海流中,来流的方向、大小以及湍流度都有可能同时发生变化,因此有必要考虑参数同时变化带来的影响。本文采用正交实验法,选取来流的攻角、雷诺数、湍流度 3 个因素,每个因素选取 4 个影响水平,采用正交试验法组成了 16 种试验方案,以计算流体力学数值模拟技术对 NACA63440 这一典型翼型进行定常流动数值模拟。

1 正交试验方案的确定

1.1 试验因素确定

选取决定水翼动力学特性的海流攻角、雷诺数、湍流度 3 个参数作为此次试验的考察因素。

因素 A: 攻角 $\alpha(^{\circ})$, 翼弦与来流速度之间的夹角,代表来流的方向。

因素 B : 雷诺数 Re , 表示作用于流体微团的惯性力与粘性力之比, 代表来流的大小。

因素 C : 湍流度 $I(\%)$, 脉动速度的均方根与平均速度的比值, 代表来流的品质。

1.2 因素水平选取

对决定水翼动力学特性的每一个试验因素取 4 水平, 制订了 $L_{16}(4^3)$ 正交试验设计方案。具体因素水平见表 1, 16 个数值试验方案见表 2。

表 2 正交试验设计方案

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$A/(^\circ)$	6	6	6	6	12	12	12	12	18	18	18	18	24	24	24	24
$B/(\times 10^5)$	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
$C/\%$	2	4	6	8	4	6	8	2	6	8	2	4	8	2	4	6

表 1 因素水平表(3 因素 4 水平)

水平	因素		
	$A/(^\circ)$	$B/(\times 10^5)$	$C/\%$
1	6	0.5	2
2	12	1	4
3	18	1.5	6
4	24	2	8

2 数值模拟方法

2.1 计算区域

NACA634 系列翼型在 NACA 翼型中总体性能表现良好, 本文采用 CFD 软件 FLUENT 对该系列中的 NACA63440 翼型进行数值模拟研究。其中弦长 $L=100\text{ mm}$ 。根据本文研究目标, 计算区域最大尺度为 $25L\times 20L$, 如图 1 所示。计算中采用 C 型结构化网格。根据文献[8], 二维网格总数通常以万作为数量级, 将对计算精度并无大的影响。本文计算区域网格划分总数为 5 万。

2.2 边界条件

在计算区域进口处, 根据雷诺数和攻角, 分别给定来流方向和垂直来流方向的速度分量; 在出口处, 由于计算区域足够大, 湍流流动充分发展, 给定充分发展条件; 在翼型表面处, 给定无滑移、无穿透边界条件。

2.3 湍流模型

对于不可压缩粘性流体, 在笛卡尔坐标系下, 其定常运动的数值解受控于 $N-S$ 方程, 平面流动的连续性方程和动量方程^[9]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases}$$

湍流模型采用由 Spalart 和 Allmaras 于 1992 年提出的单方程 Spalart-Allmaras (S-A) 湍流模型, 该模型是一种相对简单的一方程模型。通过求解一个有关涡粘性的输运方程, 恰当求解边界层受粘性影响的区域, 是一种有效的低雷诺数湍流模型。S-A 模型在计算受制于压力梯度的边界层流动中取得了很好的结果, 由于具有较好的鲁棒性并且能够处理复杂流动的能力, 近年来得到了很广泛的应用。

2.4 定解条件

流动介质为水, 暂不考虑其它物质存在。在标准状况下, 密度 $\rho=10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 并保持为常数。动力黏性系数为 $1\times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。采用压力基求解器 (pressure based), 依次求解各方程。采用隐式 (implicit) 算法将离散的非线性控制方程线性化, 使其成为每一个计算单元中相关变量的方程组。由于求解问题为二维问题, 忽略重力影响。方程中压力—速度采用 SIMPLE 算法耦合。压力项采用标准格式离散, 动量方程和修正后的湍流黏度方程采用二阶上迎风格式离散。

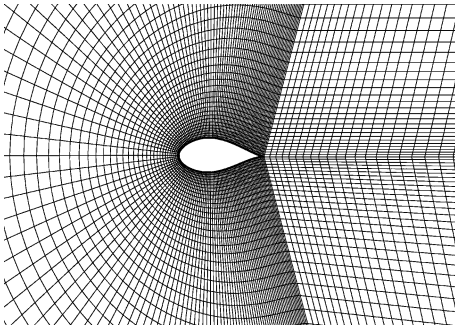


图 1 网格划分

3 结果与分析

3.1 试验结果与分析

为消除尺寸影响,本文将对计算结果无量纲化。定义升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 分别为

$$C_L=\frac{L}{0.5\rho U^2A} \quad C_D=\frac{D}{0.5\rho U^2A}$$

式中: L 和 D 分别为水翼所受到的升力和阻力, U 为无穷远来流速度, A 为参考面积。整个数值模拟结果整理后如表 3。

表 3 数值模拟结果

方案	C_L	C_D	C_L/C_D	方案	C_L	C_D	C_L/C_D
1	0.084	0.106	0.793	9	0.583	0.592	0.985
2	0.185	0.282	0.656	10	0.778	0.777	1.001
3	0.258	0.374	0.690	11	0.229	0.201	1.139
4	0.226	0.334	0.677	12	0.399	0.367	1.087
5	0.303	0.348	0.871	13	0.969	0.997	0.972
6	0.443	0.479	0.925	14	0.283	0.257	1.101
7	0.459	0.489	0.939	15	0.507	0.490	1.035
8	0.166	0.159	1.044	16	0.600	0.580	1.035

由表 3 可知,方案 13 获得的升力系数最大, $C_L=0.969$ 。方案 1 获得的阻力系数最小, $C_D=0.106$ 。方案 11 将获得的升阻比最大, $C_L/C_D=1.139$ 。表 4 为计算结果分析,表中 K_i 为相应水平 i 的试验结果之和, \bar{K}_i 为相应水平 i 的试验结果的平均值, R 为极差。由表 4 得到的折线图,如图 2~图 4 所示。

表 4 数值试验结果分析

指标		A	B	C	指标		A	B	C	指标		A	B	C
C_L	K_1	0.753	1.939	0.762	C_D	K_1	1.096	2.043	0.723	C_L/C_D	K_1	2.816	3.621	4.077
	K_2	1.371	1.689	1.394		K_2	1.475	1.795	1.487		K_2	3.779	3.683	3.649
	K_3	1.989	1.453	1.884		K_3	1.937	1.554	2.025		K_3	4.212	3.803	3.635
	K_4	2.359	1.391	2.432		K_4	2.324	1.44	2.597		K_4	4.143	3.843	3.589
	\bar{K}_1	0.188	0.485	0.191		\bar{K}_1	0.274	0.511	0.181		\bar{K}_1	0.704	0.905	1.019
	\bar{K}_2	0.343	0.422	0.349		\bar{K}_2	0.369	0.449	0.372		\bar{K}_2	0.945	0.921	0.912
	\bar{K}_3	0.497	0.363	0.471		\bar{K}_3	0.484	0.389	0.506		\bar{K}_3	1.053	0.951	0.909
	\bar{K}_4	0.590	0.348	0.608		\bar{K}_4	0.581	0.360	0.649		\bar{K}_4	1.036	0.961	0.897
R	0.402	0.137	0.417	R	0.307	0.151	0.468	R	0.349	0.056	0.122			

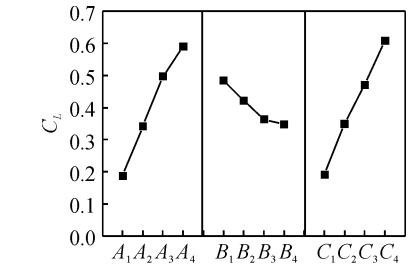


图 2 升力系数与各因素关系

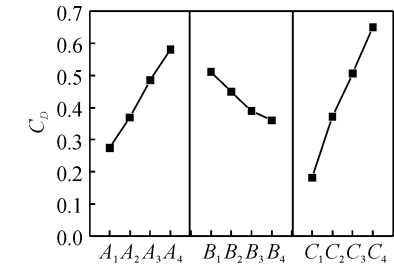


图 3 阻力系数与各因素关系

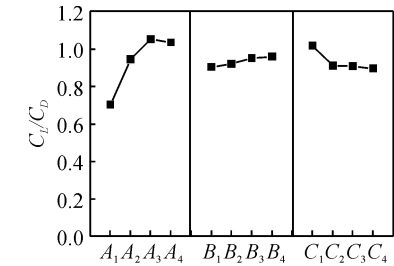


图 4 升阻比与各因素关系

由表 4 中极差 R 的大小可知,绕流翼型海流的各个表征参数对升力系数和阻力系数的影响相同,各因素影响的主次顺序为 C 、 A 、 B 。对升阻比的影响顺序为 A 、 C 、 B 。结合表 4 和图 2、图 3、图 4 可知:

因素 A : 翼型的升阻力系数随着攻角 α 的增加明显增加。升力系数、阻力系数从攻角为 6° 时的 0.188 和 0.274 分别提高到 24° 时的 0.590 和 0.581,增幅高达 314%和 212%。升阻比却随着来流攻角的增加先增加后减小。因此,在一定攻角范围内,增加攻角可有效地提高升阻比,升阻比存在一最大值,同时对应一攻角临界值。超过该攻角的临界值,可以明显看出水翼发生失速。在本例中,当攻角是 18° 时,NACA63440 翼型

存在最大的升阻比。

因素 B:升阻力系数随着雷诺数 Re 的增加明显减小,升阻比呈上升趋势。前后升阻比从 $Re=50\ 000$ 时的 0.905 提高到 $Re=200\ 000$ 时的 0.961,增幅为 6%,总体上增幅不大。因此,增加来流的雷诺数,对于提高翼型升阻比有积极意义。

因素 C:升阻力系数随着来流湍流度 I 的增加明显增加,但升阻比呈下降趋势。从 $I=2\%$ 时的 1.019 减小到 $I=8\%$ 时的 0.897,减幅为 12%。

综上所述,对于翼型 NACA63440,当 $I=2\%$, $Re=200\ 000$, $\alpha=18^\circ$ 时将取得最为理想的升阻比。

3.2 翼型流场压力与速度分布

根据 3.1 分析结果,以 $I=2\%$, $Re=200\ 000$, $\alpha=18^\circ$ 作为定解条件,进一步求得该翼型的压力场和速度场。

图 5 为翼型 NACA63440 在最理想状况下的流谱图,图 6 为压力系数分布图,图 7 为速度场分布图,图 8 为翼型表面压力系数分布图。可以看出,在攻角 $\alpha=18^\circ$ 时,尽管攻角较大,但由于来流的雷诺数相对较低,因此,还没有出现边界层分离等现象,翼型处于良好的绕流状况。翼型绕流为附着流,未发生漩涡分离的情况。在该攻角时,在翼型前缘下方位置压力系数较高,在前缘上方,即上表面的前半部分,压力系数较低。此处最易发生空化。而且从翼型上下表面的压力系数分布图上,可以看出,上表面的压力系数均低于对应位置处下表面处的压力系数,具有较大的压差,使得翼型具有良好的水动力学性能。而且在翼型的前半部分,上下表面的压差明显更大,表明此时翼型的升力主要由前半部分产生。

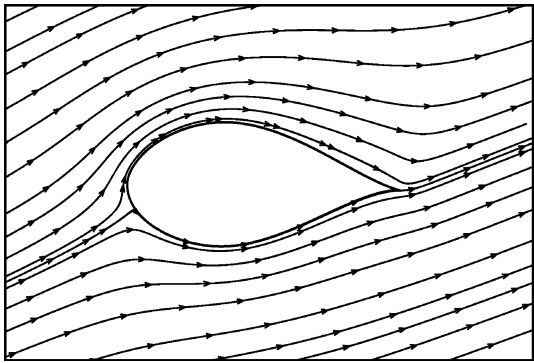


图 5 理想的流谱图

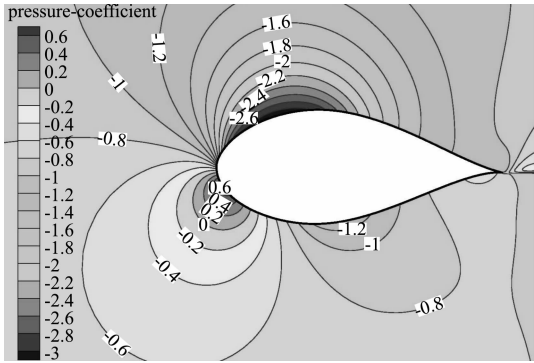


图 6 压力场

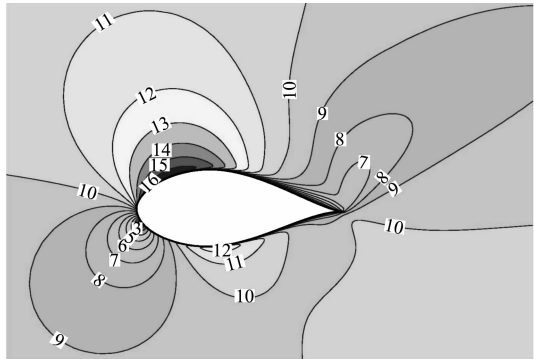


图 7 速度场

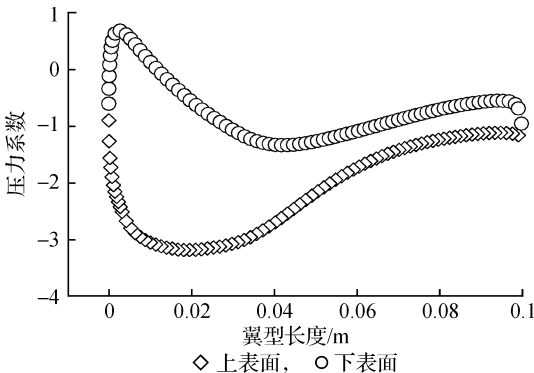


图 8 翼型压力系数分布

4 结 论

本文选取海流的攻角、雷诺数和湍流强度 3 个因素,制订了正交试验设计方案,通过 NACA63440 翼型数值模拟得到如下结论:a)来流品质和方位对升、阻力系数影响明显;b)增加攻角可有效提高升阻比,但存在一极值,超过该极值,水翼发生失速;c)增大雷诺数可适度提高翼型升阻比;d)在边界层未分离情况下,翼型前半部分是产生升力的主体区域,且在前缘上部存在空化的可能。

参考文献:

- [1] 郝宗睿, 王乐勤, 吴大转, 等. 水翼瞬态启动非定常流动数值模拟[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(2): 131-135.
- [2] 吴大转, 焦 磊, 王乐勤. 绕翼型加速流动的数值模拟-加速度的影响[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 423-425.
- [3] 吴大转, 王乐勤. 绕大攻角翼型加速流动的数值模拟[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 68-72.
- [4] Pham T M, Larrate F, Fruman D H. Investigation of unsteady sheet cavitation and cloud cavitation mechanisms[J]. J Fluids Eng, 1999, 121(2): 289-296.
- [5] Kawanami Y, Kato H. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(8): 788-794.
- [6] 李向宾, 刘淑艳, 王国玉, 等. 绕水翼空化流动速度分布的 DPIV 测量与分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 276-281.
- [7] 李向宾, 王国玉, 张敏弟, 等. 绕水翼超空化流动形态与速度分布[J]. 力学学报, 2008, 40(3): 315-321.
- [8] 韩宝玉, 熊 鹰, 陈双桥. 对二维翼空化流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(6): 740-746.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

Hydrodynamic Simulation of Hydrofoil Marine Current Turbine Applies

ZHANG Yu-liang¹, ZHU Zu-chao^{1,2}, CUI Bao-ling², LI Yi², JIN Ying-zi²

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. The Laboratory of Fluid Transmission and Application, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the aggravation of energy crisis in world, the energy of ocean current is greatly focused. At present, the most important application is the use of marine current turbine, the performance of which depends on the hydrodynamic performance of hydrofoil mostly. In order to study the influence of ocean current's parameters on hydrodynamic performance of hydrofoil, according to the characteristic of random fluctuation in ocean current, angle of attack, Reynolds Number and turbulence intensity are selected as three factors of orthogonal experiment in this paper, and every factor selects four influence levels to carry out a $L_{16}(4^3)$ orthogonal experiment. The hydrodynamic performance of hydrofoil NACA63440 that marine current turbine often applies is numerically simulated under steady flow condition for sixteen schemes, and the influence laws of ocean current's parameters on hydrodynamic performance of hydrofoil are analyzed in detail. The results of numerical simulation show that the influence of turbulence intensity on hydrodynamic performance of hydrofoil is maximal, the angle of attack is next, while Reynolds Number is minimal. The influence of turbulence intensity and angle of attack on lift coefficient and drag coefficient of hydrofoil is more evident. Increasing angle of attack can improve effectively lift-drag ratio, but it has a extremum. If angle of attack exceeds the critical value, the hydrofoil will appear stalling phenomenon. Increasing Reynolds Number can improve moderately lift-drag ratio. The forebody of hydrofoil is the main region that generates lift, and the top region of forebody is most vulnerable to cavitation. Above research conclusions will provide significant reference for more hydrodynamic performance research of hydrofoil.

Key words: hydrofoil; orthogonal experiment method; numerical simulation; performance prediction

(责任编辑: 杨元兆)