

一种变角度导流装置的水动力设计

王俊皓^{1,2}, 李国富¹, 徐晓倩¹, 郑烨堃¹, 施韬晦¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 借鉴风力机扩散器原理, 基于提高冲击式海浪发电装置的发电效率, 设计了一种变角度导流装置。低流速情况下, 由于导流罩原因, 扩大了内部初始海流对叶轮的冲击力, 增加海浪利用效率; 在高流速条件下, 通过变角度逐渐缩小进流口面积, 防止内部叶轮超载工作。提取影响导流罩保护性能的因素, 应用 RNG 湍流模型对 3 个主要因素进行分析, 选取 III 级海浪流流速计算相关数值, 最后通过模型试验对其性能进行验证。试验选取半径 0.5 m 叶轮, 入口流速达到 8.1 m/s 时外部流体冲击叶轮的有效面积为 0.058 m², 此情况下不足以启动叶轮。模型分析和验证结果均表明, 加装变角度导流罩对叶轮有较明显的保护作用。

关键词: 导流罩; 保护性能; 数值模拟; 试验验证

中图分类号: TK79

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0197-05

Hydrodynamic design of a kind of variable angle deflector

WANG Junhao^{1,2}, LI Guofu¹, XU Xiaoqian¹, ZHENG Yekun¹, SHI Taohui¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Key Laboratory of Roll Forming Technology of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: With the help of principle of wind turbine diffuser and based on improving generation efficiency of impulse wave device, the paper designed a kind of variable angle deflector. When flow velocity is small, the deflector expand the impact force of internal initial current on impeller and increases the utilization ratio of wave; under condition of high flow velocity, the variable angle device can gradually reduce inlet area so as to avoid internal impeller overload. The paper extracted the influence factors of dome protection and applied RNG turbulent model to analyze three main factors, and selected level III waves flow velocity to calculate related numerical. The experiment methods validated its performance by making model. The test selected radius 0.5 m impeller, inlet flow rate reaches 8.1 m/s for 0.058 m², this case is not sufficient to start the impeller. The results indicated that the installation of variable angle dome has evident protective effects on the impeller.

Key words: dome; protection performance; numerical simulation; experimental verification

波浪能作为最理想和最有潜力的绿色能源之一, 被世界各国所关注^[1]。由于受风载荷等因素影响, 在使用定角度海浪型导流罩时, 随着表层流速超过叶轮转速, 海浪型发电装置发电效率降低, 其有效使用风浪的范围受到限制。

对于水轮机导流罩的应用研究, 最先在河流域内进行。最具有代表性的为加拿大的 Faure 和 Pratte^[2], 他们对于应用在河道处的垂直轴水轮机, 首次提出在其结构外部加装导流罩的设想。随后,

阿根廷的 Ponta F L 等^[3]再次提出应用在河流中的水轮机加装导流罩的问题, 并基于此做了一些有针对性的试验分析, 结果表明导流罩能使流体能量集中起来, 使叶轮附近水域的流速增大。随着数值模拟技术的发展和运用, Roger Bedard 等^[4]通过前期的数值模拟以及后期试验模型制造的两种相结合方式, 设计了一种利用外部导流罩的多叶片形式构成的 2MW RTT 发电式的水轮机。刘斌^[5]利用非定常涡面元方法对安装有导流罩的水轮机在运行过程中

收稿日期: 2014-12-18; 修回日期: 2015-03-20

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY12E09001); 浙江省科技厅项目 (2012C35006)

作者简介: 王俊皓 (1988-), 男, 浙江舟山人, 硕士, 研究方向: 小型海浪发电装置。

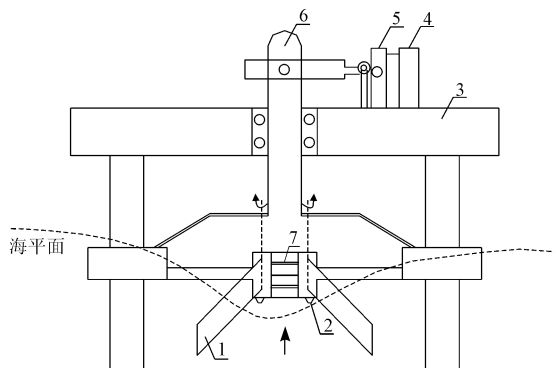
通讯作者: 李国富 (1966-), 男, 浙江台州人, 硕士, 教授, 研究方向: 机电测控、新能源应用。

的性能,进行基于理论研究的一些计算,分析水动力机理并提出在海洋环境中使用的导流罩的几何参数和其安装位置对性能的影响。还有一些方法通过控制系统提高转子附近的流速,但水轮机对控制系统的依赖过大。孙科^[6]研究带有“后门”的垂直轴导流罩,在流速增加的情况下并未考虑对内部叶轮的保护性能。

本文提出了一种变角度导流罩式海浪发电装置,并重点研究了装置的聚流效果,及其在高流速时保护叶轮不超载工作的性能。变角度导流罩装置相对于定角度导流装置而言,在波浪流速较高时,对波浪冲击有柔性的改变。

1 变角度导流罩结构

如图 1 所示,变角度导流罩、支架平台、储能设备发电机为一整体,通过支架固定海底。变角度导流罩漂浮于海平面,外部海浪经导流罩集流,带动内部叶轮转动从而发电。变角度导流罩装置在特定海浪流速冲击下会发生转动,初始开口以常见 III 级海浪流速为准。变角度装置整体安装于漂浮海平面的平台,通过入射导流板的转动实现装置对海浪冲击叶轮有效面积的调节。外部海浪流速较小时,叶轮机械处于装置内部,流体在导流罩内加速,提高波能密度降低叶轮启动速度;随着海流流速增加,变角度装置开始转动并收缩出口面积,通过减少有效冲击叶轮面积达到保护叶轮的目的,扩大波速的有效利用范围。



1. 变角度导流罩 2. 浮体 3. 支架平台 4. 储能设备
5. 发电机 6. 传动轴 7. 垂直型叶轮

图 1 变角度导流罩发电装置主视图

影响变角度导流罩性能的因素较多,最主要的为导流口长短轴、导流罩形状、导流口起始角度值 3 个方面。导流口长短轴的比值决定变角度装置随着外部海浪流速转轴转动的效果;导流罩形状选择对进入内部的流体流速影响较大^[7];导流口起始角度

值决定着在高流速情况下导流罩对内部叶轮的保护性能。应用软件模拟以及试验装置验证,基于上述 3 个方面研究变角度导流罩对叶轮的保护性能。

2 数值模拟

利用 CFD 软件,可模拟在同流速情况下,不同形状导流口进流流场的形态,以及模拟在变化流场的情况下,出口面积的变化值。

2.1 模型建立

不同的模型有其自身的特点,RNG 模型基于 $k - \varepsilon$ 模型、RSM 模型的基础上,通过优化重组方法使得其在复杂海域条件下应用具有更好的准确度^[8]。湍流动能以及耗散率方程跟 $k - \varepsilon$ 相近:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k u_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon u_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + \varepsilon_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases}$$

式中: $G_k = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $G_b = \beta_{gi} \frac{u_i}{P_{ri}} \frac{\partial T}{\partial x_i}$;

$$\mu_{eff} = \mu_i + \mu_t; \mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

式中: G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能; G_b 为浮力影响引起的湍流动能; α_k 、 α_ε 分别为湍流动能和耗散率的有效普朗特数的倒数。

2.2 网格及边界条件设定

FLUENT 模拟计算中,边界条件的设置好坏对最后结果有较大影响^[9]。在对模型计算时,进口为导流口出口为外部凸缘,无关内壁属性为无滑移壁面,设定海浪运动过程中对内壁为瞬态冲击过程。选取边界条件为:

(1) 入口边界:速度入口,无量纲速度。根据不同模型设定恒定流速值;

(2) 出口条件:沿流线方向各流动参数的导数 $\frac{\partial u_i}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = 0$;

(3) 导流罩上下边界条件:选取自由边界条件,即 $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$;

(4) 壁面边界条件:采用无滑移条件,即 $u = 0$, $v = 0$;

模拟选用雷诺数值为 $Re = 2.2 \times 10^4$ 。ICEM 中以内部冲击叶轮为中心,按区域建立相关的模拟形

态,计算过程使用二维网格。研究不同选择参数情况下的数值变化,并按二阶水流模拟结果选取数值进行分析,采用 SIMPLE 解法计算^[10]。

3 导流罩整体设计

3.1 长短轴比值设计

应用 RNG 湍流模型对恒定冲击流速条件下,计算分析外部导流板转动角度值变化情况。根据不同流速情况,选取参数分别为 2: 1,3: 1,4: 1 三组长短轴比值,其他参数保持不变情况下,其分析结果如图 2 所示。

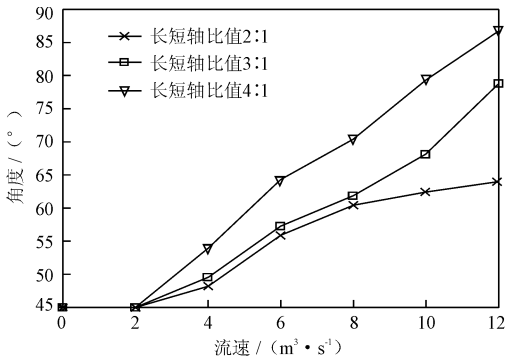


图 2 长短轴比随流速的角度变化

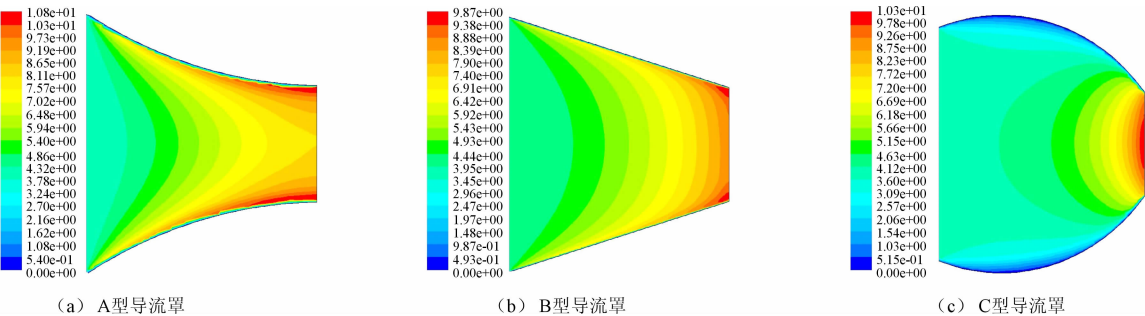


图 4 3 种导流罩流场分析结果(单位:m/s)

3 种导流罩进流流场模拟分析结果显示:在流速设置为 4 m/s 恒定流,口径比值为 1.5 时,A 型导流罩对内部流体聚流效果优于其他两组。选取不同尖速比叶轮,分别就 3 种导流罩的波能利用率进行分析。数值计算分析结果,如图 5 所示,在一定尖速比情况下,A 形导流罩波能利用率最高。

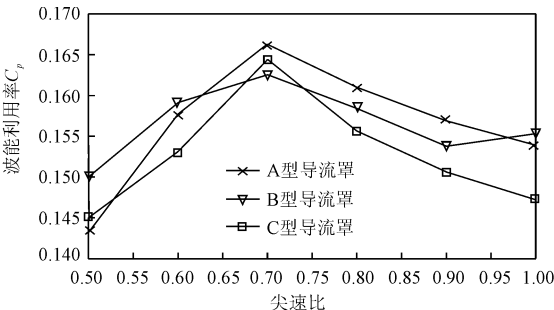


图 5 尖速比与波能利用率的关系

3.2 导流罩形状设计

根据导流口性能选取如图 3 所示 3 种形状的导流罩。导流罩模型总长度为 40 cm,A 型向外弯曲 10°,B 型倾斜 30°,C 型向内弯曲 15°。

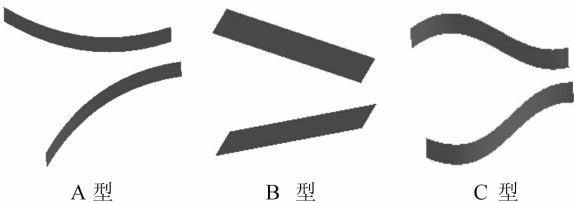


图 3 3 种不同形状导流罩

选择二维求解器中二维轴对称基于压力隐式稳态求解器。该流动问题雷诺数较大,忽略粘性力对海浪流动的影响,在 Model 中选择 In viscid。定义相关参数以及边界条件后进行求解,结果如图 4 所示。

由图 4 得:A 型导流罩各截面流速增加均匀;C 型导流罩在前半程截面流速变化不大,后半程截面流速急剧增加,对导流罩机械结构冲击过大,能量损失严重;B 型导流罩内部流场变化均匀,但流速变化幅度不剧烈,出流冲击叶轮的速度不如 A 型导流罩。

3.3 导流罩角度设计

按 2.2 中边界条件设定以及网格划分的说明,在不同起始角度值情况下对导流罩进行模拟分析。结果如图 6 为导流罩角度随波浪变化的 FLUENT 仿真结果,在采用 A 形导流罩时,低流速时聚流作用明显,最大流速出现在尾部凸缘处。在高流速冲击下,由于变角度转动的原因,出口面积变小,此时虽然出口流速急剧增加,但有效冲击叶轮面积减小,不足以带动叶轮转动。

图 7 为出流口流速设置为 8.7 m/s 时的仿真结果。此时,出流口流速明显增大,当最大流速出现冲击叶轮时,尾部凸缘结构处流速出现减小现象,验证了在高流速情况下,通过改变出口收缩面积对内部流场的调节,可以保证叶轮不在高流速情况下超负荷转动。

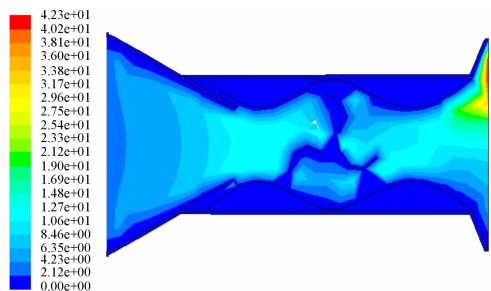


图6 导流罩角度随波浪变化

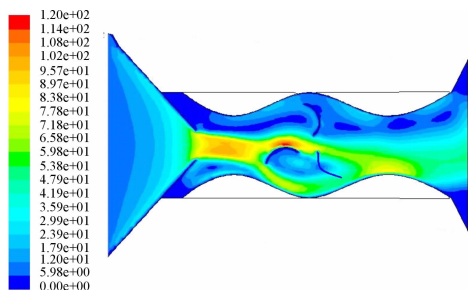


图7 出口对有效面积的影响

通过数值模拟计算分析导流罩起始角度与波能利用率影响关系,如图8所示。结果表明当导流罩角度选择 80° 时,具有最低波能利用率值;选取导流罩开口角度值为 45° 时,波能效率最大。

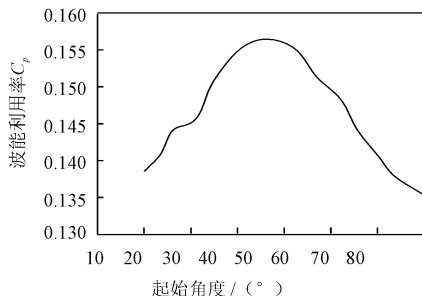


图8 波能利用率与起始角度的关系

4 试验验证

依据上述分析,得到的最佳变角度导流罩设计参数如下:采用A型导流罩结构,长轴与短轴之比为3:1,导流罩开口角度变化范围为 $45^\circ \sim 90^\circ$,起始导流罩口径比为1.5。试验装置内部安装三片冲击式叶轮机构,其叶片弯曲弧度为 15° ,转动机构为套筒结构,具体结构如图9所示。变角度导流装置内部斜面短轴长度为50mm,外部长轴设计长度为150mm,弯曲度为 13° 。按III级海浪冲击流速作为变角度导流罩转动的起始条件,其转动角度的变化范围为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 。



图9 变角度导流试验装置

应用试验水槽进行测试,试验采用常见式造波器,对产生波浪的流速进行测试,并测取变角度随海浪流速变化角度值。装置漂浮于水槽面上,随着波浪的冲击在流速值达到 3.91 m/s 时,外部变角度导流板开始转动,符合常规III级海浪流速条件下转动。随着流速的增加,角度值出现变化,利用角度仪进行测量,最终结果选取平均值进行处理。经过多组试验得出的试验值略小于模拟计算值,分析原因主要包括装置材料的干涉以及测试器材的误差影响有效冲击面积系数的准确选取。然而试验结果值变化趋势与理论模拟分析保持相同,如图10所示。

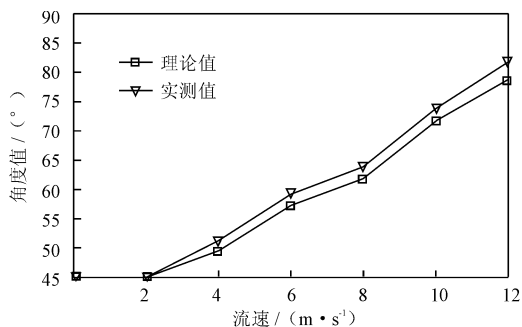


图10 流速与角度变化的关系

由于测试条件的限制,海浪对叶轮的有效冲击面积测试比较困难,现选用定质量水流在一定高度冲下来模拟海浪的冲击流速。势能转化为动能形式为 $v = \sqrt{2gh}$ 。

导流试验装置内部叶轮半径值为 0.5 m ,当外部海浪流速为 8.1 m/s 时冲击叶轮的有效面积为 0.058 m^2 ,此时叶轮无法转动。流速达 9.3 m/s 时,导流罩进流面积趋于0值,有效保护内部叶轮。

5 结 语

从提升冲击式海浪发电装置的波能利用率的角度,提出一种变角度导流装置,通过建立数学模型、模拟与试验分析,研究了影响变角度导流装置性能的主要因素,结果表明:

(1) 导流口长短轴 $L_1/L_2 = 3:1$ 的设计相较于其他两组,不仅起到聚流效果还可以减少装置耗材问题。

(2) 模型分析和数值模拟表明,在导流罩形状设计时,向外弯曲一定弧度的 A 型导流罩对外部流体的聚流效果最佳。

(3) 导流罩起始角度为 45° 时,装置对海浪能利用值达到最大。在对 $15^\circ \sim 80^\circ$ 的开始转动角度值选择比较时,波能利用效率最大差值 0.033。

(4) 试验装置的验证测试结果与模拟分析结果趋势一致,说明 RNG 湍流模型对装置模拟处理的可靠性。

参考文献:

- [1] 蔡男,王世明.波浪能利用的发展与前景[J].国土与自然资源研究,2012(6):92-94.
- [2] Faure T D, Pratte B D, Swan D. The darrieus hydraulic turbine model and field experiment[C]//. 4th Int. symposium on hydropwer fluid machine, 1986:123-129.

- [3] Ponta F L, Jacovkis P M. A vortex model for darrieus turbine using finite element techniques [J]. Renewable Energy, 2001, 24 (1): 1-18.
- [4] Roger Bedard, Mirko Previsic, Omar Siddiqui, et al. EPRI north american tidal in stream energy conversion feasibility demonstration project [R]. EPRI Survey and Characterization, California, 2005.
- [5] 刘斌. 带导流罩的竖轴潮流水轮机水动力性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [6] 孙科. 竖轴 H 型叶轮及导流罩流体动力性能数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [7] 赵峰, 陈延信, 刘文欢, 等. 不同形式导流板对旋风器性能影响的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2007, 26 (2): 242-246.
- [8] 李虹, 刘维柱. 微型轴流风扇结构改进的数值与实验研究 [J]. 机械设计, 2014, 31 (9): 75-81.
- [9] 左宝来. 皮带转运站用 LJD 除尘器的流场分析 [J]. 中国科技博览, 2011, 24 (2): 87-89.
- [10] 阎超, 于剑, 徐晶磊, 等. CFD 模拟方法的发展成就与展望 [J]. 力学进展, 2011, 41 (5): 562-589.

(上接第 196 页)

4 结 语

基于海上风电试验样机现场振动试验,分析了海上风电结构在不同风况下风机开停过程中的振动规律,主要结论如下:

(1) 根据不同风级开停机过程风电结构振动规律,将风电结构开机振动过程分为了停机状态、过渡过程、开机过程和运行状态 4 个阶段;停机振动过程分为了运行状态、停机过程、惯性缓冲和停机状态 4 个阶段。

(2) 试验样机在不同风级开机工况风电结构振幅均比正常运行时更大,范围在 $11.23\% \sim 58.45\%$;不同风机停机工况风电结构振幅波动剧烈,与正常运行比较变化范围在 $-25.73\% \sim 387.33\%$ 。

(3) 各测点水平位移幅值与其高度比值能够满足 0.5% 的要求,该风电结构在开停机过程中能够满足结构设计要求。

(4) 采用 STD 方法识别出风电结构整体自称频率,首阶频率为 0.33 Hz。

参考文献:

- [1] 祝贺. 直驱永磁风力发电机组数学模型及并网运行特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [2] 田茂金. 海上风机支撑结构疲劳寿命分析方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [3] Vicente Negro, José - Santos López - Gutiérrez, Dolores Esteban M, et al. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines [J]. Renewable Energy, 2014, 63: 125-132.
- [4] 李凯文, 宋波, 黄帅. 考虑流固耦合效应的海上单桩式风电塔动力响应研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 318-324.
- [5] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势 [J]. 海洋工程, 2009, 27 (2): 130-134.
- [6] 董霄峰 王海军. 海上风电复合筒型基础样机振动试验报告 [R]. 天津: 天津大学, 2013.
- [7] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50135-2006 高耸结构设计规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] 王峰, 陈棋, 余国城. 大型风力发电机组塔架刚度的研究 [J]. 能源工程, 2005 (6): 38-40.
- [9] 练继建, 王海军, 秦亮. 水电站厂房结构研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [10] 王济, 胡晓. Matlab 在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.