

折线型悬浮导流罩的水动力设计

陈正寿^{1,2}, 赵 陈¹, 刘 羽¹, 赵春慧¹, 王莉萍³

(1. 浙江海洋学院船舶与海洋工程学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江欧华造船股份有限公司, 浙江 舟山 316101;
3. 中国海洋大学数学科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要:为提高一种可根据海流方向做自适应调整的轴流悬浮式潮流能水轮机结构的运行效率,设计了对水轮机外围加装带外包络的三段式导流罩结构,采用数值仿真方法对该导流罩结构进行水动力性能分析,并结合模型试验进行验证。数值仿真结果表明,收缩段和扩散段都为 15° 攻角的折线型导流罩的水动力性能良好,带导流罩比未带导流罩在相同工况下水轮机输出功率提高30%左右;模型试验得到与数值模拟相近流场数据,证明该导流罩结构收缩段和扩散段的形状阻力相对较小,直线段流速稳定,导流聚能效果明显,为与该水轮机结构相匹配的最佳三段式折线型导流罩结构。

关键词:导流罩;水轮机;潮流能;折线型;水动力分析

中图分类号:TV136⁺.1;P743.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)04-0049-06

Hydrodynamic design of suspending duct with fold line shape//CHEN Zhengshou^{1,2}, ZHAO Chen¹, LIU Yu¹, ZHAO Chunhui¹, WANG Liping³(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhejiang Ouhua Shipbuilding Company Limited, Zhoushan 316101, China; 3. School of Mathematical Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to improve the operating efficiency of a suspending type axial-flow tidal current turbine, which can be self-adaptive according to the direction of ocean current, a three-section duct with outer envelope has been installed around the turbine. The hydrodynamic performances of this duct have been analyzed with numerical simulation method and the results have been verified by model tests. It has been found that the duct with fold line shape, where the attacked angle of constricting section and proliferation section is 15° , has excellent hydrodynamic performances and the power output of turbine with duct is approximately 30% more than that without duct under the same condition. Besides, the similar flow field data have been obtained from model tests. That is, the form resistance of constricting and dirergent sections is relatively small, so the energy conversion effect is obvious for steady flow velocity in straight-line section. Therefore, the duct with fold line shape best matches this turbine scheme.

Key words: duct; water turbine; tidal current energy; fold line shape; hydrodynamic analysis

在能源消费量持续攀升和传统能源日趋紧缺的今天,积极地开发清洁能源已经成为各国能源发展的共识。在各种海洋新能源形式中,能流密度相对较高的潮流能开发的机器装置研究更是日渐受到人们的重视^[1]。潮流能是因潮汐涨落引起海水流动而产生的循环可再生的海洋能量形式。潮流能的利用原理与风力发电相似,其发电装置被形象地比喻为“水下风车”^[2]。由于潮流流速的大小随着太阳、月亮与地球三者之间位置的不同而不停地变化,虽然其变化规律已知,但是潮流流速有很长一段时间处于较低水平,导致潮流能水轮机发电功率较小。目前关于提高潮流能水轮机工作效率的有效方法就

是加装导流聚能装置。1998年,阿根廷的ISEP小组提出了一种对潮流能水轮机的性能提高有很大帮助的技术改进措施,即加装导流罩^[3-4]。加装导流罩后,转子附近水域的流速增大,在相同输出功率下,转轴的尺寸可以减小,从而减小传动装置的尺寸,降低系统的建造成本;由于转动区域内流体速度可以自我调节,使得水轮机对控制系统的依赖性大大降低。因此研究并设计水动力性能优秀、简单实用的导流罩结构是有必要的。

借鉴固定式轴流水轮机与风机扩散器的构造原理^[5-7],笔者设计了一种可根据海流方向做自适应调整的轴流悬浮式潮流能水轮机结构^[8-10],将带有自

悬浮及抗倾覆功能的薄壁导流聚能装置安装于该结构的涡轮叶片周围,以提高这种新型潮流能水轮机的水动力性能和发电效率。本文通过 CFD 数值仿真分析,并辅以模型试验方法,对该自悬浮式潮流能水轮机的导流罩流体性能进行分析,以期在采用三段式剖面形状这种简单造型的前提下,优化导流罩结构的水动力性能,提高水轮机系统的运行效率。

1 导流罩型面设计与建模

关于潮流能水轮机导流罩型面设计相关的研究成果比较多,其设计原理与风力扩散器相似,即利用流线型壁面对流场的干扰,让更多的流体进入导流罩,提高罩内的流速;水轮机置于导流罩内部,相当于增大了来流速度,可提高水轮机发电效率^[11-12]。

1.1 悬浮型导流罩设计

一般来说,导流罩的结构设计需要参考 5 条基本原则^[11]:①轮机前方的平均流速大于来流速度;②轮机前方流速均匀;③导流罩所受阻力尽可能小;④结构简单,容易制造;⑤上述原则冲突时,水动力性能优先。

基于风力扩散器设计原理,同时参考风洞中收缩段和扩散段的设置方案^[13-17],本文采用包含收缩段、直线段和扩散段的三段式导流罩结构,并在其外围设置平直的外包络构成中空薄壁结构的设计方案。该中空的悬浮式潮流能水轮机导流罩在垂直于轴线方向的投影相对较小,因此收缩段和扩散段的形状阻力以及直线段的流态是导流罩性能设计需要重点关注的问题。由于曲面薄壁的密封空心导流罩加工难度较大,收缩段、扩散段的入口和出口处亦存在形状阻力较大的问题^[11],参考曲线型导流罩设计方案具备良好水动力性能的特性,在收缩段和扩散段采用便于实际加工且攻角大小适宜的折线型代替复杂的曲线型,以期简化导流罩制造工艺。该折线型导流罩收缩段和扩散段的长度相同,与直线段所成攻角大小一致,对称设置于直线段的上下游,如图 1 所示。

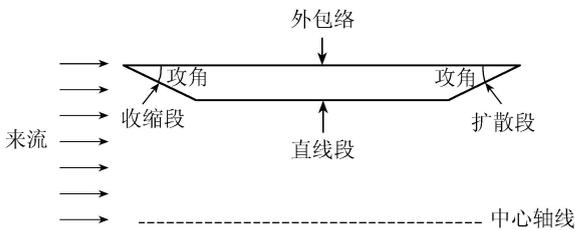


图 1 折线型导流罩纵剖面各分段命名及各部分位置

本导流罩设计方案,旨在采用较简单型面的前提下,尽可能减小水流阻力,提高水轮机前流速,确保导流罩内流场的均匀性。通过数值模拟仿真,筛

选出应用于模型试验的最佳剖面形状,提高水轮机的运行效率。

1.2 悬浮式折线型导流罩参数确定

在进行该悬浮式潮流能水轮机样机建造之前,首先采用非线性有限元结构分析软件进行初步的结构强度计算。在保障可安全承受最大 5.0 m/s 入流速度的较多安全余量下,确定采用 3 mm 厚的钢板进行各个部件的焊接。根据浙江海洋学院渔具与水动力实验室的实验条件,确定出潮流能水轮机的适宜尺度,预设导流罩内沿半径 318.50 mm 以及导流罩内平直段长度 500 mm。编制 Matlab 程序,分别求得导流罩前沿攻角为 5°、10°、15°、20°、25° 和 30° 共 6 种结构设计方案中导流罩的尺寸,如表 1 所示。在此计算过程中,空心部分径向高度等数据的获得是通过设定单个导流罩结构提供的浮力等于整个结构的重力这个基本前提而得出的。

表 1 不同攻角下导流罩的外形尺寸

攻角/ (°)	内半径/ mm	空心部分 径向高度/ mm	外半径/ mm	空心导流 罩提供的 浮力/N	导流罩外包 络的直线投影 长度/mm
5	318.50	69.00	387.50	230.00	2080.02
10	318.50	60.30	378.80	129.01	1184.31
15	318.50	55.50	374.00	98.62	914.47
20	318.50	52.60	371.10	84.62	789.19
25	318.50	50.80	369.30	76.88	718.01
30	318.50	49.60	368.10	71.99	671.92

1.3 CFD 数值建模

本文基于 CFX 软件稳态计算方法,开展导流罩在敞水状态下的水动力性能模拟。流场计算域以导流罩结构中心为基准,设置长度为导流罩轴长的 25 倍、半径为导流罩外半径的 10 倍的圆柱形区域,如图 2 所示。整个流场区域采用结构化网格拓扑结构,在靠近导流罩的壁面区域增加网格密度,而在导流罩外围则适当放宽网格尺寸,以减小数值模拟的运算量^[18-19],如图 3 所示。流场出、入口边界条件分别设置为零压力出口、均匀流速入口。针对导流罩流线型较好的特点,数值仿真中选用 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型;内、外导流罩边界定义为摩擦壁面,外部流场边界定义为无摩擦的滑移壁面。

为了更好地掌握计算过程中导流罩内的流场变化,先进行单独导流罩仿真计算,确定水动力性能较优的导流罩结构后,再进行导流罩和水轮机整体数值模拟。在此,选定拖曳力、导流罩内平直段的水流特性和输出扭矩的数值大小作为检验导流罩水动力性能优劣的判定依据,通过监测导流罩的受力情况、导流罩内流场平稳程度以及在包含叶轮工况下的水轮机叶片受力和扭矩输出值,从而定量分析导流罩的导流聚能效果。

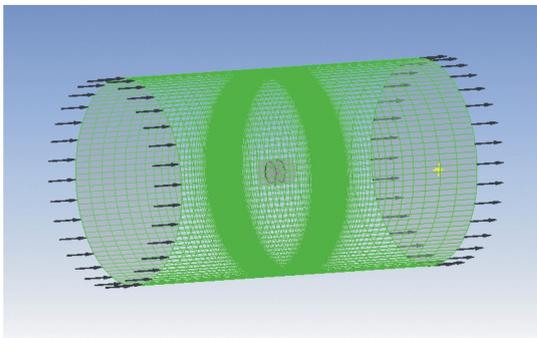


图2 导流罩流体计算区域

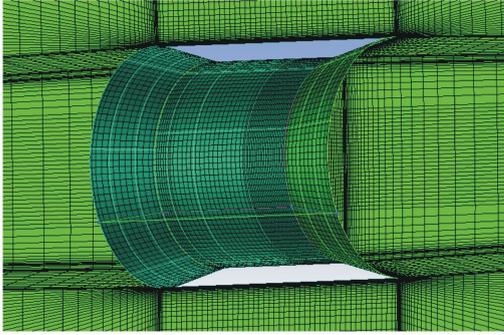


图3 导流罩的网格拓扑结构

2 折线型导流罩水动力性能仿真分析

2.1 拖曳力对比分析

对于水下低速航行器或者海洋结构物,其与流体之间的阻力主要由两部分构成:摩擦阻力和形状阻力(即压差阻力)。图4为表1所示6种不同攻角的导流罩结构在0.5~5.0 m/s来流速度工况下数值模拟得到的总阻力值。

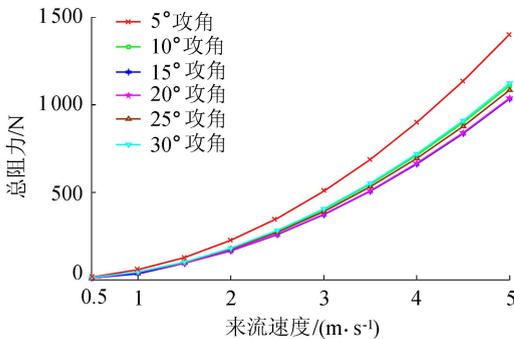


图4 不同攻角的导流罩结构总阻力值与来流速度的关系曲线

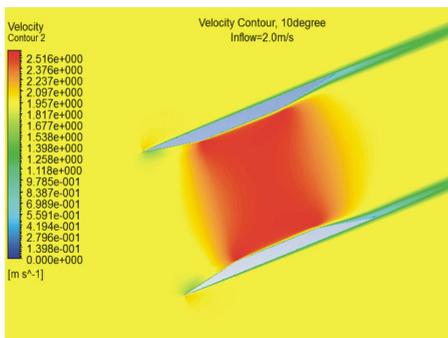
由图4可见,15°攻角的导流罩结构在各工况下受到的总阻力值最小;20°攻角的导流罩所受总阻力和15°攻角时十分接近(前者比后者大3%左右);攻角为25°、30°和10°的导流罩总阻力比15°和20°的有明显增大的趋势,在来流速度超过1.5 m/s后,总阻力值增大均超过7%;5°攻角的导流罩总阻力值比其他各型导流罩结构的总阻力值有较大幅度增加(超过20%)。从结构上看,攻角更小时,对应的导

流罩型面结构的轴向长度较大,因其与水的接触面积较大,摩擦阻力在总阻力中所占比重逐渐加大,因而无须再做关于更小攻角的验证计算;而当攻角较大时,导流罩沿轴线方向长度较短,虽然摩擦阻力变小,不过因其下游开口侧攻角较大,流体过早地在导流罩的扩散段分离,形成尾流低压区域,形状阻力在总阻力中所占比重逐渐加大,因此也无须实施更大攻角型面结构的进一步验证计算。由此可见,总阻力值仅在适宜攻角下才会有最小值。如上计算结果所示,15°攻角的导流罩结构在各种工况下受到的总阻力值均为最小,是符合导流罩设计原则的优选结构类型。

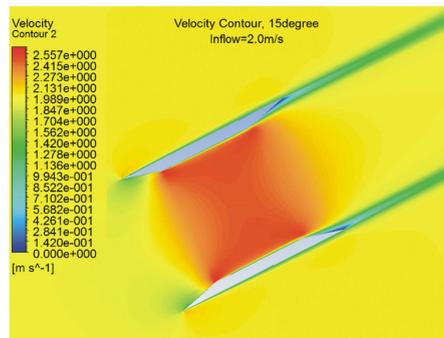
2.2 导流罩内流场分析

观察不同攻角导流罩纵剖面在2.0 m/s来流工况时的速度分布云图(图5)可知,在较低攻角(攻角不超过15°)的导流罩结构中,流体仅在扩散段后端较小的区域内发生了分离现象;当攻角大于15°后,流体在扩散段后端过早地发生了分离,从而导致较大的区域处于低压尾涡影响范围内,这也恰好解释了形状阻力随攻角增大而迅速增长的原因。在2.0 m/s的来流工况下,10°攻角的导流罩内直线段流速分布相对均匀,其平均速度达到2.53 m/s,导流罩的导流聚能效应非常显著;相同流速下,15°攻角的导流罩,其均匀流速段恰好位于直线段中心(即叶轮结构所处的位置),其平均速度达到2.47 m/s,而在20°的较大攻角下,导流罩内直线段的流速呈不均匀分布,在其直线段入口处最大速度可达到2.55 m/s,而在直线段中心的平均流速不足2.40 m/s,导流增速效果明显不如前两者。造成这种速度增益效果差距的主要原因,一方面是由于攻角较小的导流罩结构其外半径较大,入流流量也较大,导流效果明显;另一方面,攻角较大的导流罩结构,直线段流场受收缩段出口端束流作用影响,造成流体动能损失较大,其流场呈明显不均匀分布。相比而言,10°和15°攻角的导流罩结构在直线段中心的流速增益效果还是相当显著的,这种高效的导流聚能效应使得叶轮结构所处的位置成为导流罩内流速较大且相对稳定的区域。

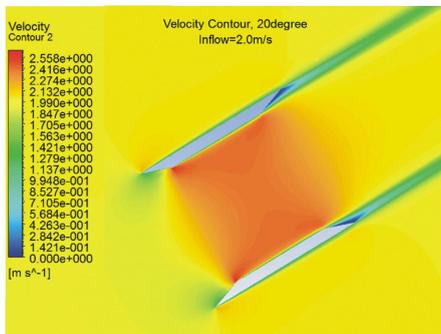
另外,在25°、30°攻角下,导流罩的收缩段前端均出现了非常明显的低流速区域(局部压力较大),这种低流速现象甚至还影响到了沿导流罩的外包裹的流速分布。导流罩内直线段流速呈现出明显的不均匀分布现象,主要表现为:最大流速出现于导流罩的收缩段末端与直线段相接的位置上,而在直线段中心的区段,其平均速度比入流速度仅有小幅的增加,导流聚能效应较弱,导流罩的作用并不明显。



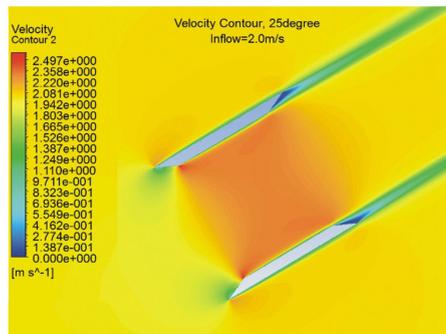
(a) 10° 攻角



(b) 15° 攻角



(c) 20° 攻角



(d) 25° 攻角

图5 2.0 m/s 来流工况下不同攻角导流罩结构的速度分布云图

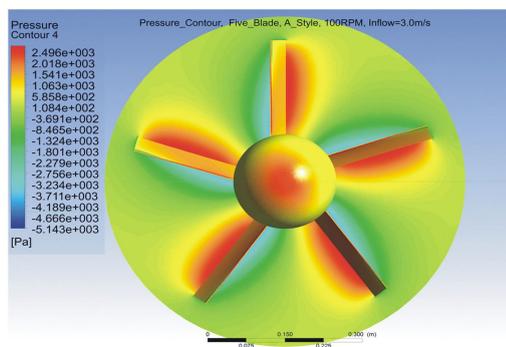
综合折线型导流罩的速度增益效果和减小所受阻力等结构水动力性能,在相同工况下 15° 攻角的折线型导流罩结构所受阻力值低于其他攻角的折线型导流罩结构 3% 以上,对来流速度的增益效果较其他结构提高 3% 左右。兼顾阻力最小和束流性能更好的考虑,该攻角型面结构更加符合导流罩设计的基本原则。

2.3 水轮机系统优化数值分析

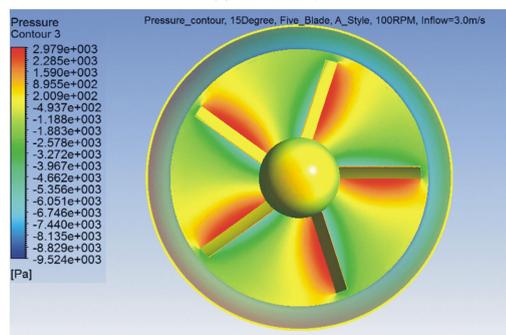
为检验 15° 攻角的折线型导流罩结构对水轮机系统的导流聚能效果,对单浮筒装置的水动力性能进行数值仿真分析,比较在有、无导流罩装置的两种工况下,水轮机输出功率的变化。

对比分析有、无导流罩两种工况下水轮机系统的压力云图可以发现,无导流罩工况下水轮机叶片翼端有较明显的低压区域(图 6(a)),而在有导流罩工况下叶片的翼端压力明显增大(图 6(b)),其最高压强值要比无导流罩工况提高 30% 左右,而这一压强增强区域恰好主要集中在叶尖区域,为力臂最长的区段。因此,该压强增强区域势必会增加水轮机叶片的有效扭矩输出以及等效电力功率输出,其较好的导流聚能作用得到了很好的展示。另外,通过对比图 7 两种工况下水轮机叶片尾流线云图亦可知,导流罩的束流效果非常明显,可以有效提高水轮机附近流体速度。

为详细比较 15° 攻角的折线型导流罩结构对水轮机系统整体效能提升的效果,本次数值模拟设置



(a) 无导流罩

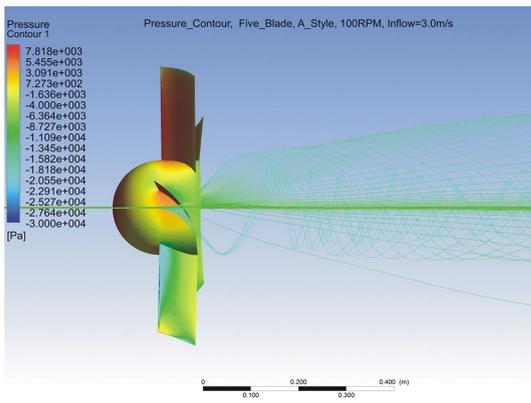


(b) 有导流罩

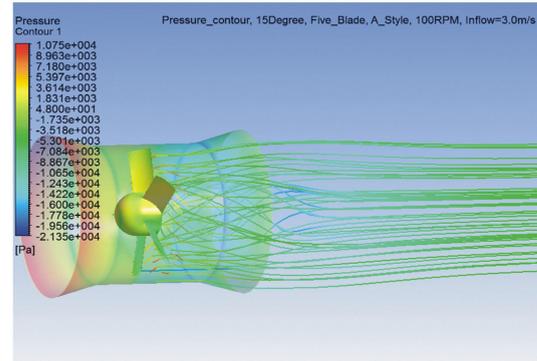
图6 叶轮系统中心横断面上的压力云图

了 10 种不同来流工况(来流速度 0.5 ~ 5.0 m/s)开展仿真模拟。选取来流速度为 2.0 m/s 和 2.5 m/s 两种典型工况进行分析,这两种工况下水轮机各项参数及输出情况如表 2 所示。

由表 2 可见,相同工况下,加导流罩后水轮机输出扭矩和功率都远大于未带导流罩工况。对于 2.0 m/s 来流速度(算例 1 和 2),加装导流罩之后



(a) 无导流罩



(b) 有导流罩

图7 水轮机尾流流线云图

表2 有无导流罩结构各项参数比较

算例	来流速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	有无 导流罩	输出扭矩/ ($N \cdot m$)	输出 功率/W
1	2.0	无	47.140	246.806
2	2.0	有	63.521	332.571
3	2.5	无	76.667	401.398
4	2.5	有	102.220	535.183

注:叶片数为5片,旋转速度50 r/min。

输出功率可以有35%的提升;对于2.5 m/s来流速度(算例3和4),加装导流罩之后水轮机输出功率提升达33%,可见导流罩的导流聚能作用非常明显。

3 模型试验

经过上述数值仿真分析,确定便于加工制作且水力性能较好的15°攻角折线型导流罩结构作为模型试验的适宜结构。

试验所用拖曳水槽长130 m、宽6 m、水深3.5 m,最大造波高度350 mm,拖车可调运行速度为0.1~6.0 m/s。试验过程中,通过控制拖车的拖曳速度使试验模型达到相应的速度,从而较好地模拟水轮机系统在对流速度下的实际工况。导流罩模型尺寸与数值模拟中一致,分别在导流罩进口、出口和导流罩外围中段对称加装高精度数字压力传感器,监测点的实际分布位置如图8所示。模型试验验证的方案

为:预设同一导流罩的多个监测位置,分别获取模型试验和CFD数值仿真的压力值,最后对比同一位置处压力值的大小,进而判定数值仿真的准确性。

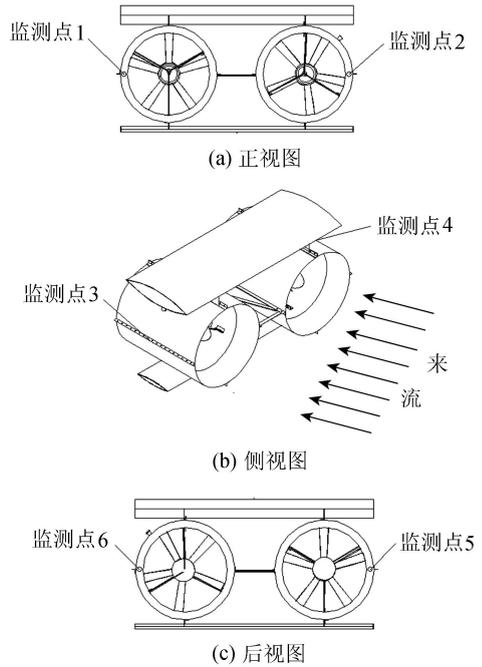


图8 导流罩各监测点分布位置

模型试验综合考虑实际工况和试验安全而展开,获取了流速0.5~3.0 m/s工况下相关试验监测数据。图9为典型来流速度2.0 m/s和3.0 m/s下模型试验的压强与数值模拟计算得到的相应位置的压强的对比情况,试验值均为减去与其监测点同一水深处静压强的相对压强。

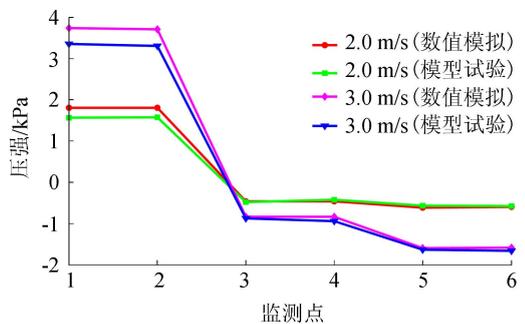


图9 不同来流速度下导流罩各监测点处压强

由图9可知,相同来流速度下,试验测得的导流罩进口监测点的压强为数值模拟中相应监测点压强的91%左右。同理,比较导流罩出口和外围中段监测点的流场压强,可以发现试验和数值模拟的比值分别为89.9%和95%。可见,相同来流工况下试验和数值模拟中流场压强差距较小,根据伯努利方程,可知两者在特征测量点的流速值也比较接近。综上所述,此次数值仿真选用的湍流模型和边界条件设置较为合理,网格划分拓扑结构较好,保证了相应结果的稳定性和准确性。

根据试验记录的水轮机启动流速要求,带导流罩工况下水轮机系统的启动流速为0.6 m/s,比无导流罩工况下水轮机系统的0.9 m/s启动流速小得多。由此可见,15°攻角的折线型导流罩能够增加叶轮附近的来流速度,有效提高水轮机系统的运行效率,具有较好的导流聚能效应。

4 结论

a. 折线型导流罩的水动力性能很大程度上取决于其收缩段和扩散段的攻角大小。攻角偏小会增加结构纵向投影面积,导致结构受到流体的阻力增大和结构质量增加;攻角偏大致使结构内部流场不均匀,导流效果较差。数值模拟显示,15°攻角的折线型导流罩结构兼具阻力较小和导流聚能效果较好的特点,水动力性能较其他攻角的折线型导流罩更优。

b. 加装15°攻角折线型导流罩的水轮机系统水动力性能数值模拟显示,导流罩结构可以大幅度提高水轮机的工作效率,相同工况下比无导流罩水轮机输出功率提高30%左右。

c. 模型试验证明了数值模拟的可靠性。15°攻角的折线型导流罩既有较好的水动力性能,又可以极大改善建造工艺,降低运营成本,为与该自适应、悬浮型潮流能水轮机的设计结构相匹配的最佳三段式折线型导流罩,更加符合导流罩设计的基本原则。

参考文献:

[1] 段自豪,陈正寿.潮流发电现状分析及未来展望[J].中国水运,2012,12(2):106-107. (DUAN Zihao, CHEN Zhengshou. Tide power status analysis and future prospect [J]. China Water Transport, 2012,12(2): 106-107. (in Chinese))

[2] 林永刚.水下风车海流能发电技术[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(7):1242-1246. (LIN Yonggang. Ocean current power generation technology for underwater turbine [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(7): 1242-1246. (in Chinese))

[3] 荆丰梅.潮流能发电增速导流罩研究[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(4):409-413. (JING Fengmei. Study on an accelerated diffuser of tidal current power generation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(4):409-413. (in Chinese))

[4] PONTA F L, JACOVKIS P M. Marine-current power generation by diffuser-augmented floating hydro-turbines [J]. Renewable Energy, 2008, 33(20):665-673.

[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] 汪鲁兵.竖轴潮流水轮机水动力性能理论与实验研究

[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学.2006.

[7] 王树杰.柔性叶片潮流能水轮机水动力学性能研究[D].青岛:中国海洋大学.2009.

[8] 陈正寿,孙孟.自适应悬浮型潮流能水轮机:中国,ZL201120112764.1[P].2011-09-07.

[9] 陈正寿,孙孟.悬浮发电水轮机:中国,ZL201120518950.5[P].2012-08-01.

[10] 陈正寿,段自豪,王晋宝,等.一种抗倾覆水轮机装置:中国,ZL201220674648.3[P].2013-06-12.

[11] 张亮.潮流水轮机导流罩的水动力设计[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(7):734-737. (ZHANG Liang. Hydrodynamic design of diversion cover for a tidal-stream hydro turbine [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(7): 734-737. (in Chinese))

[12] 陈存福.潮流能水平轴水轮机叶片优化及水动力性能研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[13] 汪建文.风力机扩散放大器流场的数值仿真[J].能源技术,2004,25(5):184-190. (WANG Jianwen. The mathematic simulation of diffuser augmented wind turbine [J]. Energy Technology, 2004, 25(5): 184-190. (in Chinese))

[14] 张连河.三元收缩段优化设计研究[J].空气动力学学报,2003,21(4):417-422. (ZHANG Lianhe. Research of optimized design of three-dimensional contraction [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21(4):417-422. (in Chinese))

[15] MATSUSHIMA T, TAKAGI S, MUROYAMA S. Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser [J]. Renewable Energy, 2006, 31(9):1343-1354.

[16] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会.高低速风洞气动与结构设计[M].北京:国防工业出版社,2003.

[17] 刘文广.收缩段线型对超音速喷管氟原子气相复合的影响[J].力学学报,2006,38(3):392-396. (LIU Wenguang. Effects on F recombination in annular hypersonic low-temperature nozzle with different contraction curves[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(3): 392-396. (in Chinese))

[18] CHEN Zhengshou, KIM W. Effect of bidirectional internal flow on fluid-structure interaction dynamics of conveying marine riser model subject to shear current[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(1):57-70.

[19] CHEN Zhengshou, KIM W, XIONG C. Effect of upward internal flow on dynamics of riser model subject to shear current[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(1):95-108.

(收稿日期:2014-04-11 编辑:熊水斌)