

轴流悬浮式水轮机抗倾覆性仿真研究^{*}

赵宗文^{1,2}, 刘 羽¹, 张国辉¹, 陈正寿^{1,3}, 赵春慧¹

(1. 浙江海洋大学 船舶与海洋工程学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江省近海海洋工程技术重点实验室, 浙江 舟山 316022; 3. 浙江欧华造船股份有限公司, 浙江 舟山 316101)

摘 要:基于 CFD 软件, 采用有限体积法, 以及固定式轴流水轮机构造原理与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, 通过数值仿真, 开展了悬浮式水轮机系统在数种工况下的纵向方向抗倾覆稳定性分析。对比了不同流速与不同倾向角之间的共 30 种组合工况, 分析了流速与倾向角对水轮机总纵力矩的影响, 发现在不同工况下, 该悬浮式水轮机在纵向方向上抗倾覆性能良好, 在各流速工况下, 均能在小倾角范围内达到稳定平衡状态, 纵向稳定状态工况下静水面平行线与水轮机中轴线夹角 γ 保持在 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 左右。本文研究结果可为轴流悬浮式水轮机的抗倾覆稳定性计算提供一定参考。

关键词:潮流能水轮机; 悬浮式; 抗倾覆性; 计算流体力学

中图分类号: P753

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2016.02.002

潮汐能是一种周期性海水自然涨落现象, 是人类认识和利用最早的一种海洋能。水平流动的潮汐动能, 被称为潮流能, 其富集点多出现在群岛地区的海峡、水道及海湾的狭窄入口处, 由于海岸形态和地底地形等因素的影响, 流速较大, 伴随的能量也巨大^[1-2]。与其他可再生能源相比, 潮流能具有以下几个特点: 较强的规律性和可预测性; 功率密度大, 能量稳定, 易于电网的发、配电管理, 是一种优秀的可再生能源; 潮流能的利用形式通常是开放式的, 不会对海洋环境造成大的影响^[3]。根据结构形式的不同, 可将水轮机分为水平轴、竖轴和横轴式水轮机。较之于竖轴和横轴水轮机, 水平轴水轮机型式的潮流能发电装置具有效率高、自启动力矩大、转动稳定等优点^[4]。基于固定式轴流水轮机与导流聚能装置的构造原理^[5], 提出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。为了保证该悬浮式潮流能水轮机能够在各种工况下正常稳定工作, 需要对该结构的抗倾覆稳性进行研究。目前对于水平轴悬浮式水轮机的倾覆设计无相应的规范规定其

^{*} 收稿日期: 2016-03-23

资助项目:国家自然科学基金项目——轴流悬浮式潮流能水轮机系统的耦合动力响应及结构颤振机理研究(41476078); 浙江省科技计划项目——环保高效型船舶附加水动力装置关键共性节能技术研究与应(2015C34013); 舟山科技计划项目——单舱大开口超级海工重吊船研发(2014C41003); 浙江省自然科学基金项目——基于第二代完整稳性的集装箱船舶参数横摇运动预报方法研究(LY14E090003)

作者简介:赵宗文(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事海岸工程与海洋工程结构与基础方面研究。

E-mail: zongwen325@126.com

(陈 靖 编辑)

分析计算方法,只能通过基本力学知识对潮流能水轮机进行倾覆的计算判断结构是否稳定。崔琳^[6]对潮流能水轮机稳定的设计要求及设计准则进行了简单的阐述,对极限流速下的整体稳性进行了对比分析,按照抗倾覆系数的标准,分析了不同底座结构对整体稳性的影响。邱飞^[7]从自行独立设计研制的水平轴潮流能水轮机组的载荷分析入手,根据计算的载荷对水轮机组支撑结构进行稳定性研究,使得水轮机组能够满足设计使用要求。JO 等^[8-9]对水平轴潮流能水轮机水动力性能进行了细致的研究。本文通过数值模拟的方式,对悬浮式水轮机系统在各种工况下的抗倾覆稳定性进行分析。

1 理论分析

1.1 水轮机运动模型坐标系的建立及基本假设

为了便于研究悬浮发电系统的抗倾覆性能,建立了悬浮自适应潮流能水轮机几何模型的坐标系,如图 1 所示,选用双转子的水平轴水轮机结构,其双叶轮旋转方向相反,两者转矩等呈对称分布,进而有利于力的抵消,增加了装置的平稳性;上、下平衡翼和导流罩为中空薄壁结构,提供浮力,为使潮流能发电装置悬浮水中,导流聚能装置将安装于叶轮叶片周围,用以提高流场中流速,从而提高叶轮发电效率。为把自适应调整的轴流、悬浮式潮流能水轮机结构的抗倾覆运动做准确的数学描述,对其运动环境及结构作如下假设:倾覆运动发生在静水面,不考虑随机外载荷因素,比如风、波浪的干扰,将有助于研究和探讨水轮机的运动情况和运动姿态;悬浮式潮流能水轮机的横倾,纵倾及垂向倾覆过程分别进行单独考虑,同时对一些不重要的构件进行了简化处理。

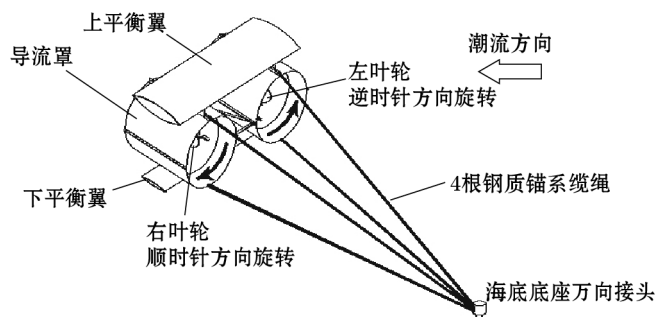


图 1 自适应悬浮型潮流能水轮机构造示意图

Fig. 1 Structural diagram of the adaptive suspension type tidal current turbine

1.2 水轮机系统不同倾覆状态

图 2~图 4 分别为悬浮式潮流能水轮机各个方向倾覆状态示意图,实际中的水轮机是自由度运动,即 3 种状态可能同时存在。如图 2 所示,水轮机 Y 轴绕 X 轴转动,即水轮机发生垂向倾覆时,水轮机的轴向方向与水流方向仍然保持一致,因此对水轮机发电效率影响不大,因此这种状态可以不需要进行重点考虑;而对于图 3 和图 4,即水轮机发

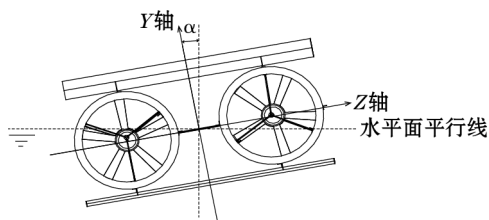


图 2 垂向倾覆-水轮机正视图

Fig. 2 Vertical overturning-front view of the turbine

生纵向和横向倾覆时,水轮机叶片的轴向方向与水流方向呈一定夹角,将对于水轮机的发电效率会产生一定影响,因此需要避免。本文所研究的抗倾覆稳性指的是图4中悬浮式潮流能水轮机在完全入水后将产生纵向倾覆运动的状态,而同时在重力、浮力以及上下平衡翼的升力相互作用下将产生回复力矩,阻碍水轮机进一步纵向倾覆的情况。

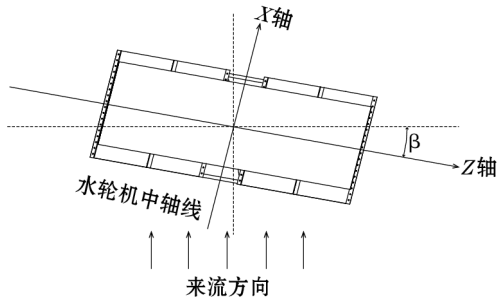


图3 横向倾覆—水轮机俯视图

Fig. 3 Transverse overturning-top view of the turbine

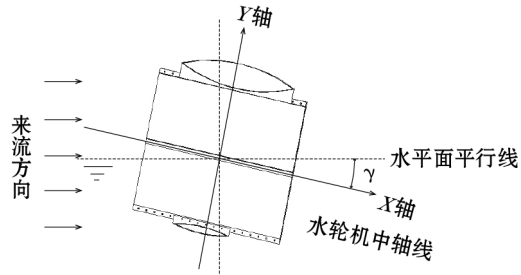


图4 纵向倾覆—水轮机侧视图

Fig. 4 Longitudinal overturning-side view of the turbine

1.3 水轮机纵向抗倾覆状态受力分析

在不考虑重力与浮力的情况下,水轮机结构在外载荷作用下会绕原点旋转,即水轮机会在合力矩的作用下倾覆,这里假设为逆时针旋转。通过理论分析得出浮心在重心之上,浮力 F_B 与重力 G 绕 Z 轴的合力矩 M_{Z1} 方向为顺时针方向,提供回复力矩,阻碍导流罩进一步倾覆,如图5所示。重心与浮心在以原点为中心的圆上运动,其合力矩可以通过计算得到:

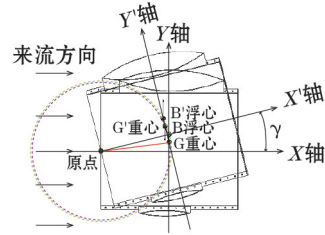


图5 水轮机纵向倾覆受力分析图

Fig. 5 Stress analysis diagram of longitudinal overturning of the turbine

$$M_{Z1} = F_B \times l_B - G \times l_G = 3\,110.739 \times \sqrt{0.15^2 + 0.457^2} \times \cos(\arctan \frac{0.15}{0.457} + \gamma) - 2\,802.694 \times \sqrt{0.024^2 + 0.457^2} \times \cos(\arctan \frac{0.024}{0.457} + \gamma) \quad (0 \leq \gamma \leq \gamma_0), \quad (1)$$

式中, γ 为水轮机的轴向方向与来流方向夹角。

2 数值仿真实验

为了对悬浮式水轮机抗倾覆性能进行准确分析,需要确定潮流能水轮机的水动力载荷,包括叶轮转子的水动力载荷和潮流能水轮机导流罩、上下平衡翼的流体载荷。本文采用 CFD-CFX 软件对其进行数值模拟分析。

2.1 建模与网格划分

计算域模型如下图所示,将流场分为3个相互接触的流体区域 A、B 和 C。其中区域 A 圆柱型域长为 20 m,半径为 6 m,区域 B 是球形,半径为 6 m,区域 C 为圆柱形旋转域,

长为 0.3 m,半径为 0.31 m。水轮机叶片位于区域 C 中,并随着区域 C 一起转动,划分方法与何煜平^[10]采用方法类似。关于流场的边界条件设置:区域 A 左侧的边界条件设置为速度入口(VINLET)类型,右侧的边界条件设置为(OUTLET)类型。区域 A 和区域 B 设为球面交界面(Interface)类型,区域 B 和区域 C 设为圆柱交界面(Interface) 类型,网格连接选择 GGI。湍流模型选用标准 $K-\epsilon$ 模型,水轮机定义为无滑移壁面。水轮机网格拓扑结构如图所示。其中左图为带有上下平衡翼的悬浮潮流能水轮机,采用了分块、结构化网格拓扑结构,近壁面采用精细网格,其他区域采用糊化网格,同时兼顾计算精度和效率^[11],右图为水轮机叶轮结构,采用非结构化网格拓扑结构,对叶片及其周围区域进行了加密。

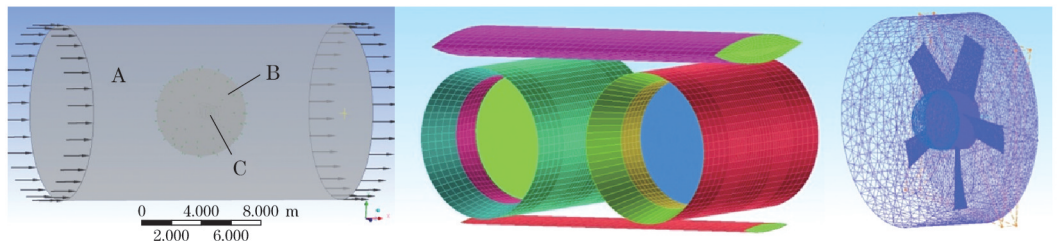


图 6 水轮机边界条件设置图与网格拓扑图

Fig. 6 Boundary condition setting and grid topology for the turbine

2.2 数值仿真结果及分析

2.2.1 计算工况

本次数值模拟选择水轮机叶轮在恒定转速 100 r/min 工况下,根据来流速度不同分为 5 个工况,每个工况下根据水轮机轴向方向与来流方向夹角不同再分为 6 个算例,通过监测水轮机各部件所受的力和力矩研究水轮机抗倾覆性能,如表 1 所示。

表 1 30 种不同工况对比

Table 1 Comparison of 30 working conditions

工 况	序 号	来流速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	纵向倾角 $\gamma/^{\circ}$	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
工况 1	1~6	1.0	0.1,2,3,4,5	100
工况 2	7~12	2.0	0.1,2,3,4,5	100
工况 3	13~18	3.0	0.1,2,3,4,5	100
工况 4	19~24	4.0	0.1,2,3,4,5	100
工况 5	25~30	5.0	0.1,2,3,4,5	100

2.2.2 数值仿真结果

图 7 是水轮机轴线方向与来流方向为 0° 夹角与 5° 夹角工况下,来流速度与轴向(X 轴方向)载荷关系曲线图。观察图可以发现,随着来流速度增大,水轮机各部件的轴向载荷都相对应提高。两图的共同特点是,在各个工况下,导流罩轴向载荷占整体轴向载荷的 35%左右,而左右两个叶轮轴向载荷基本一致,分别占整体轴向载荷的 25%左右,上下平衡翼轴向载荷所占整体轴向载荷较小,说明导流罩和叶轮的尺寸选取对减小整体轴向载

荷有着重要的影响。通过对比这两幅图还可以发现,水轮机轴线方向与来流方向夹角 γ 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内对水轮机轴向载荷影响很小。

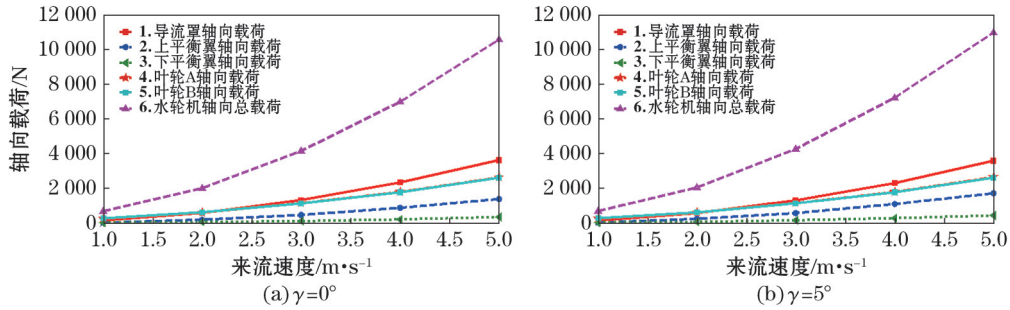


图7 不同夹角 γ 值工况,来流速度与轴向载荷关系曲线图

Fig. 7 The relationship between flow velocity and axial load at different included angles γ

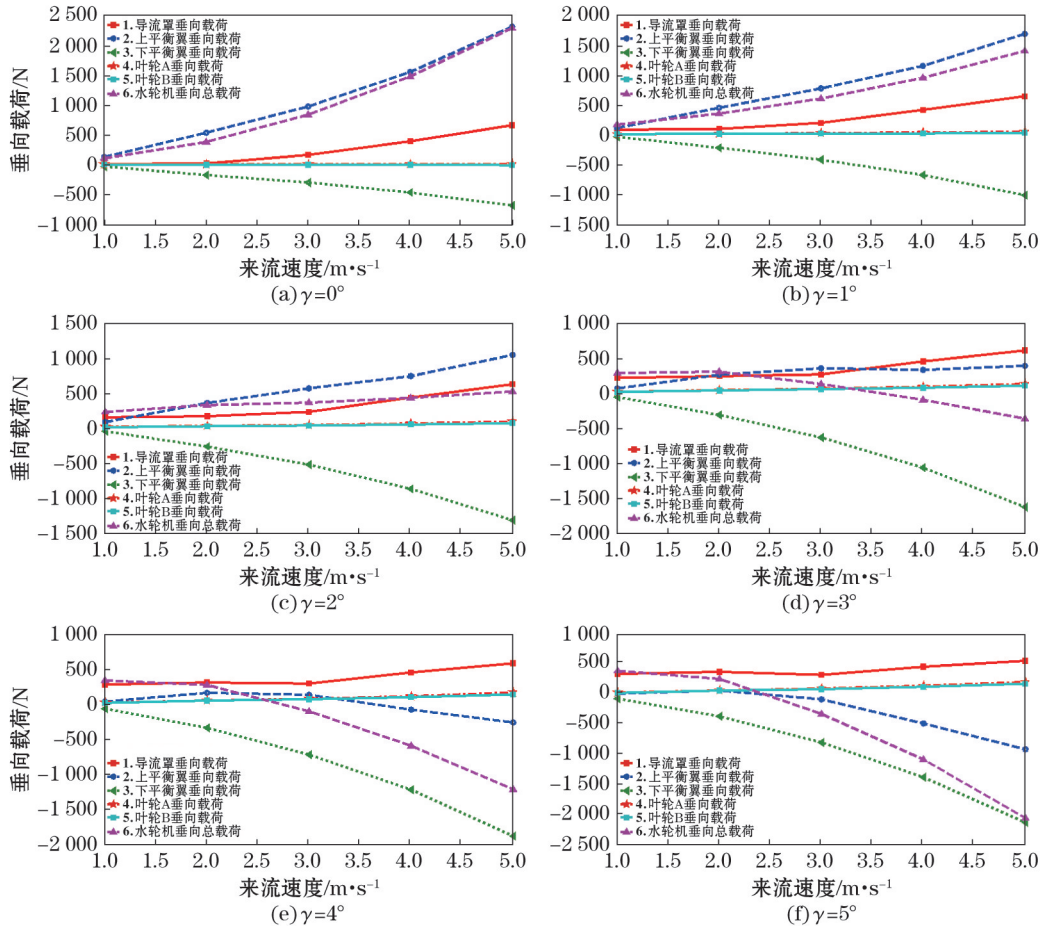


图8 不同夹角 γ 值工况,来流速度与垂向载荷关系曲线图

Fig. 8 The relationship between flow velocity and vertical load at different included angles γ

图 8 是水轮机轴线方向与来流方向为 0° 夹角至 5° 夹角工况下,来流速度与垂向(Z 轴方向)载荷关系曲线图。从这 6 幅图中可以发现,在各工况下,上下平衡翼垂向载荷绝对值较大,而左右两个叶轮垂向载荷基本一致,且所占整体垂向载荷很小,说明上下平衡翼的尺寸选取对减小整体垂向载荷有着重要的影响。观察上平衡翼垂向载荷可以发现图 8a~图 8d,在不同来流速度工况下,上平衡翼垂向总载荷始终为正值且随着来流速度的增大而增大;而在图 8e~图 8f 中,在来流速度为 1 m/s 工况下,上平衡翼垂向总载荷为正值,且随着来流速度先增大后减小,在来流速度为 3 m/s 左右达到 0 值。观察下平衡翼垂向载荷可以发现,在不同来流速度工况下,下平衡翼垂向总载荷始终为负值且随着来流速度的增大而减小,随着水轮机轴线方向与来流方向夹角 γ 增大,下平衡翼垂向总载荷减小速率增大。观察水轮机垂向总载荷可以发现,其中图 8a~图 8c 可以观察到,在不同来流速度工况下,水轮机垂向总载荷始终为正值且随着来流速度的增大而增大,而在图 8d~图 8f 中,在来流速度为 1 m/s 工况下,水轮机垂向总载荷为正值,且随着来流速度的增大而减小,在来流速度为 3 m/s 左右达到 0 值。通过基本力学分析,说明在低流速工况下,水轮机垂向载荷提供倾覆力矩,随着来流速度的增大,水轮机垂向载荷提供相反方向的力矩,阻碍水轮机进一步倾覆。

根据理论分析及数值仿真模拟结果得到水轮机结构静力计算表,选择来流速度分别为 1,3 和 5 m/s 三个工况进行讨论,如表 2 所示。通过表 2 可以发现,当水轮机轴线方向与来流方向夹角 γ 为 0° 工况,来流速度为 1 m/s 时,水轮机所受合力矩为负数,随着夹角 γ 的增大合力矩相应增大,说明低流速时,水轮机在初始时刻有绕 Z 轴顺时针旋转的趋势,随着夹角 γ 的增大到一定值达到稳定平衡状态;来流速度为 3 和 5 m/s 时,水轮机所受合力矩为正数,随着夹角 γ 的增大合力矩相应减小,说明中高流速时,水轮机在初始时刻有绕 Z 轴逆时针旋转的趋势,随着夹角 γ 的增大到一定值也达到稳定平衡状态。通过对比 3 种工况还可以发现,随着来流速度的增大,水轮机总纵力矩的大小均在夹角 γ 在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 之间达到零值,角度较小,说明悬浮式水轮机在各来流工况下纵向方向抗倾覆性能较好。

表 2 水轮机结构静力计算表

Table 2 Static calculation table of the turbine structure

项目 工况	重力矩/Nm	浮力矩/Nm	流体作用力矩/Nm			合力矩/Nm		
			工况 1	工况 3	工况 5	工况 1	工况 3	工况 5
$\gamma=0^\circ$	1 421.6	-1 280.8	39.5	-140.8	934.1	-101.3	199.6	793.3
$\gamma=1^\circ$	1 413.2	-1 279.5	71.4	-133.8	604.2	-62.4	126.1	470.4
$\gamma=2^\circ$	1 404.5	-1 277.7	100.9	-126.8	276.9	-25.8	49.7	150.1
$\gamma=3^\circ$	1 395.2	-1 275.6	129.4	-119.7	-53.8	9.7	-24.3	-173.5
$\gamma=4^\circ$	1 385.6	-1 273.0	156.8	-112.6	-381.0	44.2	-96.6	-493.6
$\gamma=5^\circ$	1 375.5	-1 270.1	183.4	-105.4	-701.2	77.9	-166.2	-806.6

3 结 论

本文通过数值模拟的方式,开展了悬浮式水轮机系统在各种工况下的纵向方向抗倾覆稳定性分析,对比了不同流速与不同倾向角之间的共30种组合工况,分析了流速与倾向角对水轮机总纵力矩的影响。

1)通数值模拟分析,水轮机轴线方向与来流方向夹角 γ 在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内对水轮机轴向载荷影响很小。发现在低流速工况下,水轮机垂向载荷提供倾覆力矩,而流体作用力提供抗倾覆力矩;随着来流速度的增大,水轮机垂向载荷开始提供相反方向的力矩,阻碍水轮机进一步倾覆。

2)不同来流速度工况下,导流罩与左、右叶轮的轴向载荷之和占整体水轮机轴向总载荷的85%左右,选择光滑线型导流罩与合适翼型的叶轮有利于减小悬浮式潮流能水轮机整体轴向水流阻力;上下平衡翼的垂向载荷的绝对值较大,其尺寸大小的选取直接影响水轮机的纵向抗倾覆性能。

3)悬浮式潮流能水轮机在不同流速工况下,均能在小倾角范围内达到稳定平衡状态,发现在不同工况下,水轮机总纵力矩均在夹角 γ 在 $2^\circ\sim 3^\circ$ 之间达到零值附近,角度较小,说明该悬浮式水轮机在纵向方向上抗倾覆性能良好。

参考文献:

- [1] 游亚戈,李伟,刘伟民.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-10.
- [2] 李慧,郝嘉凌,陶爱峰,等.中国潮汐能利用现状[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册),2013.
- [3] 段自豪,陈正寿.潮流发电现状分析及未来展望[J].中国水运,2012,2(12):106-107.
- [4] 张亮,耿敬,张学伟.潮流能研究现状2013[J].新能源进展,2013,1(1):53-66.
- [5] 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.
- [6] 崔琳.座底式水平轴潮流能转换装置设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [7] 邱飞.水平轴潮流能发电装置海洋环境载荷与可靠性分析[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [8] JO C H, LEE K H, YIM J Y. A study on the interference effects for tidal current power rotors [J]. Science China, 2010,53(11):3094-3101.
- [9] JO C H, YIM J Y, LEE K H, et al. Performance of horizontal axis tidal current turbine by blade configuration[J]. Renewable Energy, 2012,42(2012):195-206.
- [10] 何煜平.水平轴海流机叶片与漂浮式支撑的设计与研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [11] 刘羽,陈正寿,赵陈,等.潮流能水轮机导流罩的水动力性能研究[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2014,33(3):199-208.

Simulation on the Anti-Overturning of Suspension Type Axial Flow Turbine

ZHAO Zong-wen^{1,2}, LIU Yu¹, ZHANG Guo-hui¹, CHEN Zheng-shou^{1,3}, ZHAO Chun-hui¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Key Laboratory of Offshore Engineering Technology of Zhejiang Province, Zhoushan 316022, China; 3. Zhejiang Ouhua Shipbuilding Co., Ltd, Zhoushan 316101, China)

Abstract: By using CFD software and finite volume method and referring to the structural principle of fixed axial-flow turbine and the structure of suspension type axial flow tidal current turbine which can be adaptive adjustable according to the current direction, the anti-overturning stability of the suspension type tidal current turbine system in the longitudinal direction is analyzed under several conditions through numerical simulation. Totally 30 combined conditions between different flow velocities and inclination angles are compared and the influences of the flow velocity inclination angle on the total longitudinal moment of the turbine are analyzed. It has been found that under different conditions the tidal current turbine system is good in the anti-overturning performance in the longitudinal direction and can reach a stable equilibrium state in the range of small inclination angles under all flow velocity conditions. Under the condition of longitudinal steady state the included angle θ between the parallel line of static water surface and the central axis of the turbine can be kept at about 2~3 degree. All these results can offer some reference for the calculation of the anti-overturning stability of the suspension type tidal current turbine.

Key words: tidal current turbine; suspension type; anti-overturning performance; computational fluid dynamics