

座底式水平轴潮流能电站载体设计及性能分析

秦余钢, 马勇, 马良, 李鹏

哈尔滨工程大学海洋可再生能源研究所, 哈尔滨 150001

摘要 潮流能是一种可再生清洁能源, 它的有效开发利用对于改善中国的能源架构具有重要意义。潮流能电站在技术开发和工程示范两个方面都在快速发展, 但关于潮流能电站载体设计及其性能分析方面的研究较少, 远远不能满足当今技术应用快速发展的需求。本文以导流增强型潮流能电站为研究对象, 基于座底式水平轴潮流能转换技术, 开展潮流能发电装置的总体设计, 提出了3种载体方案, 并对其进行流体动力载荷计算及支撑结构强度分析。通过对不同载体结构方案进行对比可以得到, 三角形双支撑及四边形双支撑方案都能满足强度和变形的要求, 其中三角形方案的稳定性和经济性较好, 且安装维护较为便捷, 因此选定三角形双支撑方案为最佳方案。研究结果将为座底式海洋潮流能电站的开发和应用提供参考和借鉴。

关键词 潮流能; 水平轴水轮机; 载体; 座底式; 发电装置

中图分类号 TQ050.4+25

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.03.005

Carrier Design and Performance Analysis of the Bottom-supported Horizontal Axis Tidal Current Power Station

QIN Yugang, MA Yong, MA Liang, LI Peng

Institute of Ocean Renewable Energy System, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract Tidal energy is one kind of renewable energy, it is effectively developed and utilized would have the great significance to improve China's energy structure. The tidal current power station is rapidly developing in the areas of technology development and demonstration project, however the studies involving design and performance analysis of the tidal current power station carrier is quite few; it is far from meeting the demand of the fast development of technology applications. Based on the bottom-supported horizontal axis tidal current power conversion technology, the diversion enhanced tidal current power station is focused on, the overall design is proceed, three kinds of carrier scheme are put forward, the fluid dynamic load calculation and strength analysis of the support structure are made. Comparing with the different schemes of the support structure, it could be obtained that both the triangular based and quadrilateral based double support structures are able to meet the strength and deformation demands, wherein the triangular based support structure has better stability and easy to handle, it also has better economy cost. Therefore, the triangular based double support structure is the best option after the analysis. It will provide an important reference for the development and applications of bottom-supported tidal current power station.

Keywords tidal current energy; horizontal axis turbine; carrier; bottom-supported; power generation device

0 引言

随着经济的快速发展, 能源供需紧张的状况日益严重, 迫切需要找到一条节能、绿色的发展道路^[1]。潮流能^[2]作为一种可再生清洁能源, 它的有效开发利用对于改善中国的能源

架构以及发展低碳经济具有重要意义。

从20世纪末开始, 世界各国在潮流能开发利用技术方面的投资及科研力度大幅提高。加拿大开发的Blue Energy水轮机将4个翼型桨叶固定一个转轴上, 以此驱动齿轮箱和发

收稿日期: 2012-10-27; 修回日期: 2012-12-25

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(200805040)

作者简介: 秦余钢, 博士研究生, 研究方向为海洋潮流能利用, 电子信箱: qinyugang@hrbeu.edu.cn; 马勇(通信作者), 讲师, 研究方向为海洋能利用以及船舶水动力性能试验技术, 电子信箱: mayong02@hrbeu.edu.cn

电机装置,英国 Neptune Renewable Energy(NRE)公司开发出了 Neptune Proteus 潮流能发电装置,英国 MCT 研制了桩柱式水轮机 SeaGen,还有由 Open Hydro 公司设计,欧洲海洋中心(EMEC)的座底叶栅式潮流能水轮机,哈尔滨工程大学自行设计建造了中国第一座 70kW 的潮流实验电站^[3],中国海洋大学研制成功一种基于竖轴水轮机的漂浮式潮流发电装置^[4]。潮流能转换装置正在向结构形式多样化、装机容量大型化和建造安装便捷化方向发展,已经开发出 100kW 级、MW 级商业规模机型,并实施了海上示范运行和检测。目前,各国的研究机构已经开始了潮流发电装置规范与标准体系构建以及潮流能发电场建设相关技术的研究工作。

潮流能发电装置按载体安装形式可分为座底式^[5,6]、漂浮

式^[7]、桩柱式^[8]。座底式,也称重力式,是一种依靠重力基脚增加装置与海底的摩擦力,从而使装置固定在海底的结构形式;漂浮式是一种载体装置浮于水中或水面,并通过锚链或张力腿固定于工作海区的结构形式;桩柱式,即支撑结构主体为一个立柱,立柱一端固于海底,水轮机和发电机安装于立柱中间或立柱另一端的结构形式。

1 潮流电站总体设计

潮流水轮机主要由转子^[9]、导流装置、支撑载体等结构组成,设计过程中考虑的因素颇多,且需要权衡各技术性能指标的要求。其总体设计的相关内容及流程见图 1。

对于本文中的导流增强型潮流能电站,其设计思路如

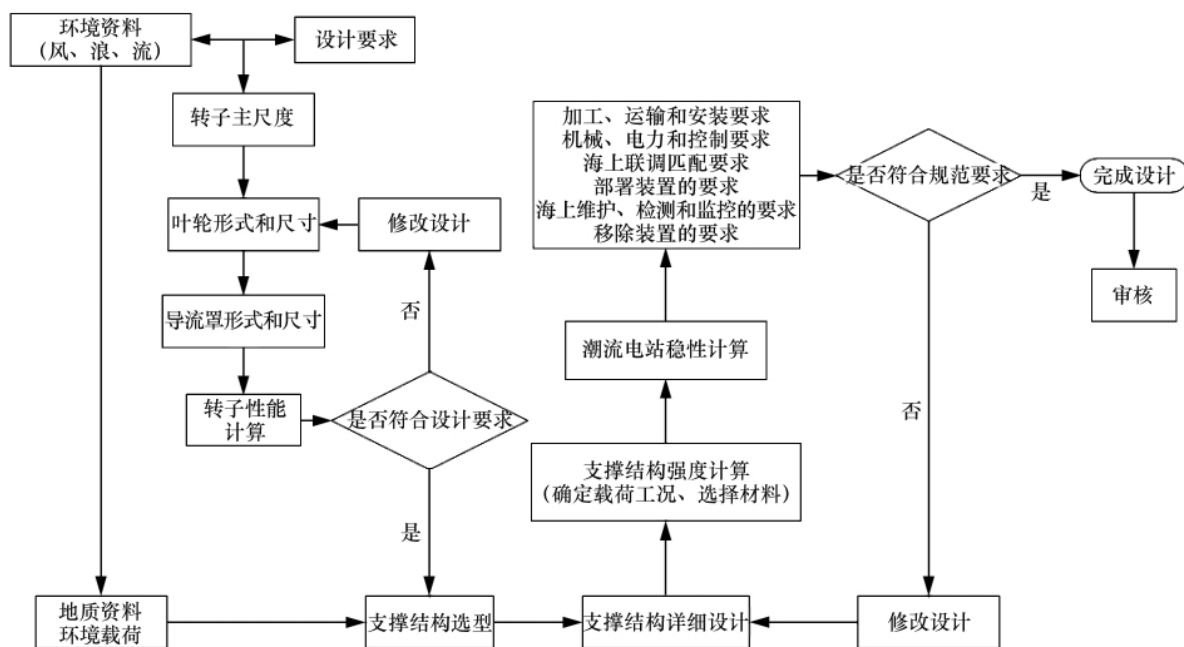


图 1 潮流水轮机设计流程

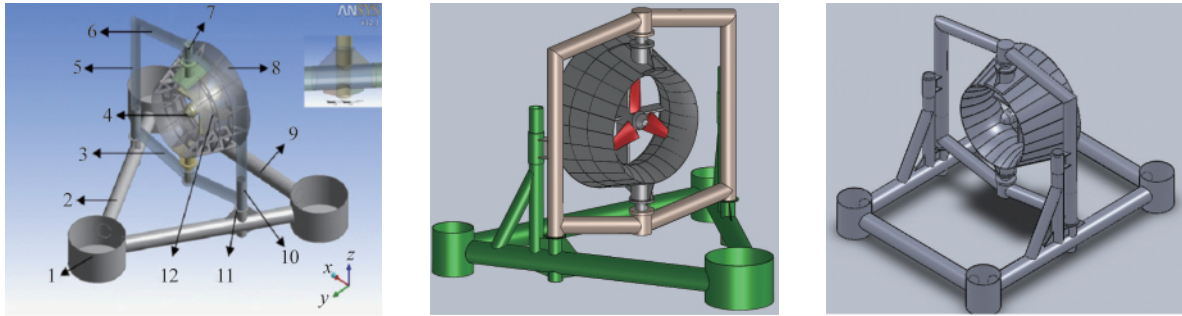
Fig. 1 Design process for tidal turbine

下:首先,依据环境资料 and 设计要求提出合理的装置形式。然后,根据装机容量和工作地流速估算出叶轮的主尺度及叶片数^[10],由叶轮尺度确定导流罩的尺寸和型线。最后,根据已经确定的转子水动力载荷,考虑环境条件(如水深、地质)完成装置载体的方案设计、结构设计和详细设计。载体设计完成之后,对电站的结构强度进行分析,并确定最佳方案。

对潮流发电装置载体进行总体结构形式设计时,应始终遵循以下原则:(1)结构简单可靠;(2)后期维护方便。基于以上两个原则,本文提出 3 种载体结构设计方案(图 2)。

方案 1 中,底座结构采用三角形,并在其中两根底座横梁上各设立一内套管。内套管穿过横梁,并用肘板加强局部连接,使得内套管与底座横梁形成一体,提高了内套管的承

载力。方案 2 同样采用三角形底座的配置,但在内套管附近又增加一立柱钢管,并与底座横梁钢管之间通过斜撑连接,与方案 1 相比,方案 2 的优势在于,叶轮及导流罩的潮流载荷可以分两路传递至底座,一路通过支撑管,另一路通过立柱钢管,这样使流载荷合理地疏散,有效缓解了应力集中现象。方案 3 在方案 2 的基础上将三角形底座配置改为四边形底座配置,并相应增加了 1 个压载桶。3 种方案在底座的角上都分布有压载筒,压载筒内装压载,起到防止整体结构发生滑移及翻转的作用。压载可分为铸钢和混凝土两部分,可以通过调节两者的比例满足压载重量和体积的要求。压载筒之间由横梁相连,横梁为空心,内部填充混凝土压载,以增加压载量。



(a) 方案 1
(a) Scheme one
(b) 方案 2
(b) Scheme two
(c) 方案 3
(c) Scheme three

1—压载筒;2—底座横梁;3—框架下梁;4—轮毂;5—框架立柱;6—框架上梁;7—轴套筒;
8—导流罩;9—底座横承管;10—内套管;11—法兰;12—导流罩支架

图 2 3 种装置设计方案

Fig. 2 Three kinds of device designs

2 流载荷计算

2.1 控制方程

黏性流体满足无滑移边界条件,即假定与物面直接接触的流体质点具有与物体表面相同的速度

$$U=U_b$$

水平轴水轮机流场是一个不可压缩、有黏性的非定常低速水流体流场。流场的数值解可通过求解流体力学的控制方程组完成。

守恒形式的连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = S$$

其中, \mathbf{v} 为速度矢量, ρ 为流体密度, S 为广义源项。

守恒形式的 N-S 方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho F_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho F_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho F_z$$

其中, p 为压强, u , v 和 w 分别为 t 时刻流体在点 (x, y, z) 处速度分量, τ 为切向约束, F 为作用于单位质量流体的彻体力。

2.2 叶面压力模拟

水轮机主要由叶轮、机组、支撑架和导流罩构成。叶轮转子采用双叶片结构,机舱通过十字支撑架与导流罩的内壁面连成一体,保证水动力载荷的有效传递。本文主要通过 CFD 软件计算水轮机的水动力载荷。

潮流能水轮机的数值模拟主要使用滑移网格方法,将计算域分为静止域与旋转域两部分。建模时,需要将两部分域分开建立,在静止域内部独立出旋转域。静止域的尺寸原则:通常要使得水轮机尾流达到充分发展的状态,一般出口到水轮机位置采用 10 倍以上直径的距离;入口与壁面采用 4~5 倍直径的距离。旋转的尺寸选择与水轮机尺寸有关,一般能够将水轮机完全包容在内部即可。静止域的形状采用立方体或者圆柱体均可,旋转域采用圆柱体。

划分网格时,内部计算域由于形状较为复杂,因此采用非结构网格进行划分(图 3),并且可以提高今后做优化工作时的快捷性与实效性。外部静止计算域属于规则形状,因此采用结构化网格进行划分,圆形截面网格架构采用 O 型网格,使用六面体网格对全域进行划分(图 4)。在网格划分时需要特别对叶片与导流罩的边界层网格进行细划,考虑到叶片表面边界层效应,应保证叶片表面壁面率 $y^+ < 10$,使得湍流模拟较为准确。

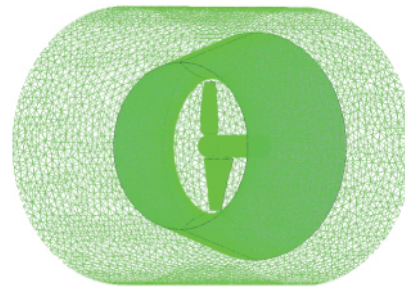


图 3 水轮机组的网格

Fig. 3 Turbine unit grid

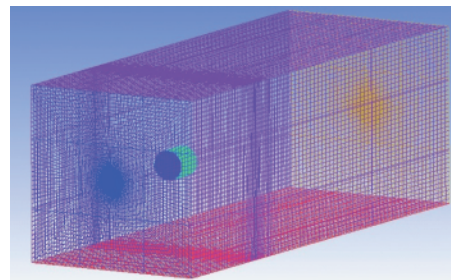


图 4 外域三维结构网格

Fig. 4 Three dimensional structure grid for outland

带有导流罩的水轮机数值模拟的网格划分方法与无导流罩的基本相同,网格主要由外域静止网格与内部旋转域网格构成,不同的是在内部旋转域网格中,同时包含了导流罩

壁面与水轮机的边界网格。在设置边界条件时,与无导流罩数值模拟的区别在于对导流罩静壁面的设置处理,由于导流罩壁面被划分在内部旋转域之中,但是导流罩壁面在惯性坐标系中静止不动,因此需将导流罩壁面设置成反转墙壁,即

导流罩在非惯性坐标系中以旋转域角速度向相反方向旋转,在惯性坐标系中静止不动。图 5 为极限流速 2.5m/s 时导流罩内部叶轮各构件的压力云图及流速分布图,图 6 为对应不同流速时叶轮、导流罩所对应的轴向载荷曲线。

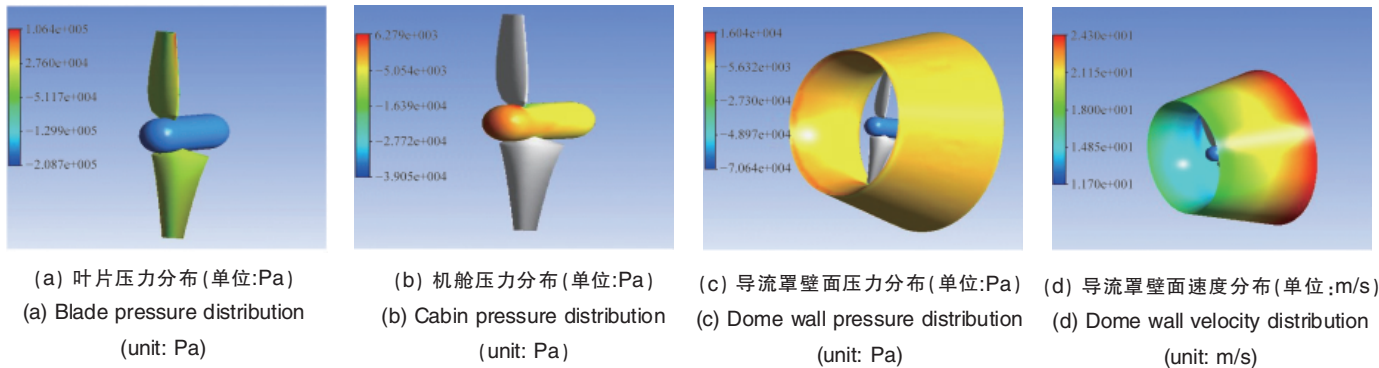


图 5 叶轮及导流罩压力及速度分布

Fig. 5 Pressure and velocity distributions for blade and dome

由图 6 可知,导流罩载荷占整体载荷的 60%左右,而叶轮和轮毂的载荷之和只占 40%。所以,导流罩尺寸的选取和控制对减小整体载荷有着重要意义。数值模拟得到的流载荷将被应用到下文结构强度分析中。

面体网格。考虑到海洋潮流的往复性,定义导流罩进水端朝向三角形底座一横边时为正向潮流工况,导流罩进水端朝向三角形底座的一个端点时为逆向潮流工况,两种工况下电站的网格结构如图 7 所示。

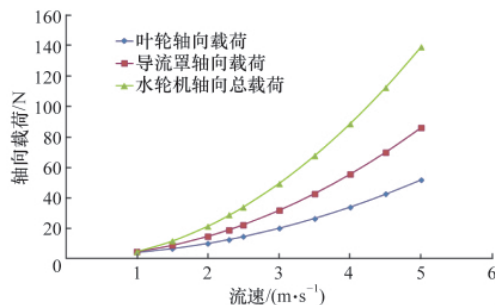


图 6 流速与载荷的关系曲线

Fig. 6 Curve of velocity vs. load relation

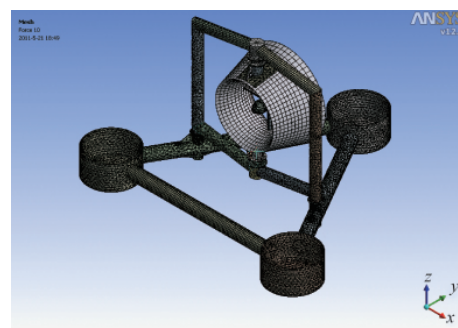
3 结构强度分析

3.1 模型建立

在确定导流罩及叶轮的尺寸后,根据其大小及载荷初步确定支撑结构的形式和尺寸,并对每种支撑结构的强度进行对比分析,选出最佳方案。利用 SolidWorks 软件进行建模。在建模时考虑结构的复杂性及计算工作量,对一些非关键构件进行简化处理:简化了导流罩与框架衔接处的轴承结构,忽略了部分小尺度构件(螺栓等),省略了非关键构件的结构特征(轮毂表面的凹凸、肘板的倒角等)。

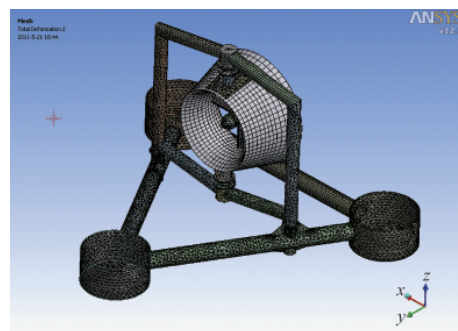
3.2 网格划分

网格划分采用 ANSYS 自由网格化分技术,单元最大尺寸定为 200mm。对于导流罩采用六面体网格,其余结构采用四



(a) 正向潮流工况 (工况 1)

(a) Positive flow condition (condition 1)



(b) 逆向潮流工况 (工况 2)

(b) Reverse flow conditions (condition 2)

图 7 电站整体网格结构

Fig. 7 Total grid structure of power station

3.3 边界条件

根据载体支撑结构的特点确定边界约束情况。对底座结构的压载筒底面进行全自由度约束,即将底座约束状态定义为 Fixed support。支撑结构在水中所受的载荷大致分为自重、流载荷、静水压力 3 类。

(1) 自重。结构自重,这里添加标准地球重力载荷,其重力加速度默认取值为 $g=9.80665\text{m/s}^2$ 。在轮毂首部以及中心分别加设 point mass,取值为 225.989kg,表示叶片和电机的质量。

(2) 流载荷。将流力作为集中载荷加载到对应构件的单元表面,取极限流速 2.5m/s。导流罩的水动力载荷直接利用 CFD 计算结果,导流罩受力 21.5kN,轮毂受力 13.1kN,分别加载在导流罩内面和轮毂首部,如图 8 所示。

(3) 静水压力。静水压力在小构件上作用很小,为简化操作与计算,静水压力仅加载在较大的结构面上。由于导流罩为面体建模,支撑结构为实体建模,静水压力须分别加载在两个结构上。其中,海水密度 $\rho=1025\text{kg/m}^3$,水深按最高设计潮位计算,取 30m。对于逆向潮流情况,只需将流力方向改为反方向即可。

3.4 结果分析

结构的变形大小反映了设计结构刚度的强弱,大的变形

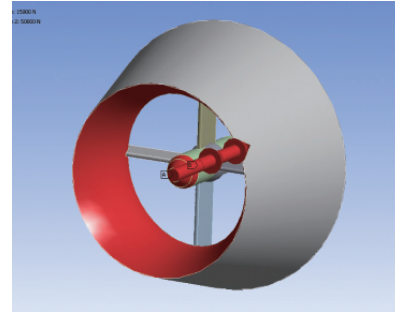


图 8 导流罩水动力加载

Fig. 8 Hydrodynamic loading on dome

不仅会导致结构的不稳定,还会使局部构件产生很大的应力,产生裂纹甚至破坏。导流罩与框架结构的连接依靠转动轴承,较大的变形会使大尺度支撑结构产生较大倾斜角度,轴承因不能绕设计的垂直轴转动而发生倾斜,这会使轴承的接触应力大幅增加,损坏轴承。同时,结构变形较大时,水轮机因不能水平运转,影响电机的正常工作,降低了能量利用率。图 9 给出了数值计算得到的 3 种设计方案在两种工况下的整体变形情况。表 1 给出 3 种设计方案在两种工况下的详细构件最大应力值和变形值。

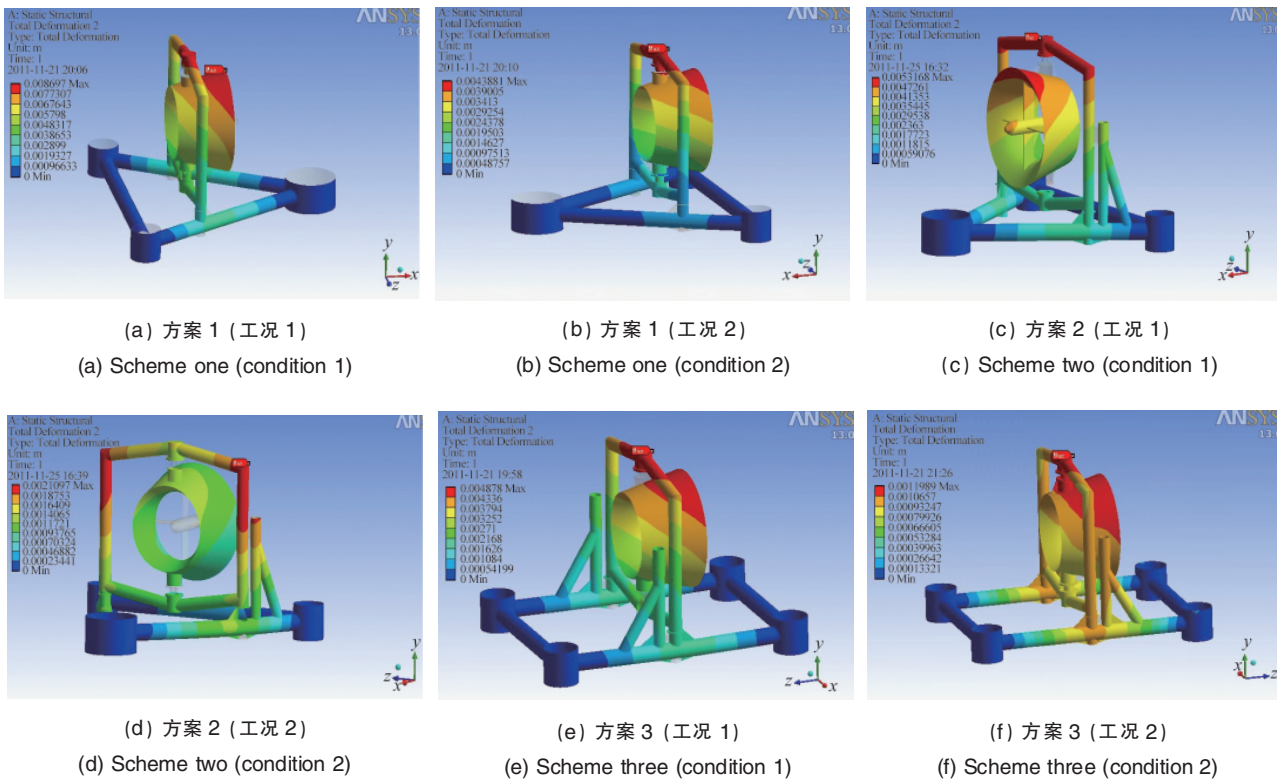


图 9 各方案在不同工况下的整体变形(单位:mm)

Fig. 9 Overall deformation of each solution with different conditions (unit: mm)

由最大变形值的对比可以看出,方案 1 的变形最大,方案 3 的变形最小。所以,方案 3 在极限流速下较其余两种方案要好。

当结构应力超过材料的屈服极限时,结构会发生断裂或产生永久变形,这将严重影响结构使用的安全性,是不允许发生的。在工程中为保证安全,还设定了安全系数,限定了结

表 1 3 种设计方案在两种工况下的详细构件
最大应力和变形
Table 1 Maximum stress and deformation of
detailed component involving three kinds of designs
with two conditions

工况	方案	最大应力 σ /MPa			最大变形 δ /mm
		框架	底座支撑杆	底座	
工况 1	方案 1	71.8	167.1	8.7	
	方案 2	42.6	132.4	120.3	
	方案 3	26.5	22.8	118.6	
工况 2	方案 1	25.9	50.2	4.4	
	方案 2	23.4	65.6	64.5	
	方案 3	16.4	23.4	43.8	

构的许用应力。根据 ABS 规范,普通结构钢的许用应力为 164.3MPa,方案 1 的最大应力为 167.1MPa,已超过许用应力值,不符合规范标准。方案 2 和方案 3 的最大应力都在许用应力范围内,方案 3 的应力要小于方案 2,在强度上,方案 3 优于方案 1 和方案 2。

4 结论

利用座底式水平轴潮流能转换技术开展潮流能发电装置的总体设计、流体动力载荷、支撑结构的强度研究,并基于方案设计和分析结果进行优化选型。对不同支撑结构的方案对比可以得到,三角形单支撑方案在设计工况中的变形及最大应力值都较大,无法满足设计要求,三角形双支撑与四边形双支撑方案都能满足设计要求,其中后者的形变及最大应力值更小一些,安全系数更高。但是,当海底为不平坦的岩石基底时,四边形结构难以保证 4 个端点都能接触海底,稳定性较低,而三角形结构则不存在这一问题。设计中还需要考虑成本因素,在保证电站载体满足使用要求的基础上,尽量减少材料使用,节约成本,同时还要考虑到装置安装以及维修保养的便捷性,在以上两点上三角形方案较四边形方案有明显优势。综合分析,选定三角形双支撑方案为最佳方案。

参考文献 (References)

[1] 汤天浩. 新能源与可再生能源的关键技术与发展趋势[J]. 电源技术应

用, 2007, 10(2): 60-64.

Tang Tianhao. Power Supply Technologies and Applications, 2007, 10(2): 60-64.

[2] 吕忻, 郭佩芳. 我国潮流能资源开发评述 [J]. 海洋湖沼通报, 2011(1): 26-30.

Lv Xin, Guo Peifang. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011 (1): 26-30.

[3] 朱典明, 李凤来, 张亮. 70kW 潮流实验电站, 96-A17-06-03 [R]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.

Zhu Dianming, Li Fenglai, Zhang Liang. 70kW tidal current energy experiment power station, 96-A17-06-03[R]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002.

[4] 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.

Wang Shujie. Study on hydrodynamic performances of a tidal current energy conversion device with flexible blade turbine [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[5] 盛其虎, 罗庆杰, 张亮. 40kW 潮流电站载体设计[C]/中国可再生能源学会海洋能专业委员会第一届学术讨论会文集. 杭州: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会, 2008: 159-168.

Sheng Qihu, Luo Qingjie, Zhang Liang. Design on the carrier of 40kW tidal current power station [C]/The First Seminar Collection of China Association for Ocean Energy. Hangzhou: The Chinese Renewable Energy Society of Professional Committee of the Ocean Energy, 2008: 159-168.

[6] 梁永超. 浅海坐底式平台设计中影响平台起浮的几个问题[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(1): 16, 42-43.

Liang Yongchao. China Offshore Platform, 2003, 18(1): 16, 42-43.

[7] 张洋. 漂浮式潮流电站锚泊系统的设计和计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.

Zhang Yang. The design and the calculation of the mooring system of the floating tidal power station [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004.

[8] European Commission. SEAFLOW-World's first pilot project for the exploitation of marine currents at a commercial scale. Report EUR21616 under Contract JOR3-CT98-0202 [R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005.

[9] Jeremy T. Development installation and testing of a large scale tidal current turbine[R]. London: IT Power, 2005.

[10] Fraenkel P L. Power from marine currents [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, 216(A1): 1-14.

(责任编辑 刘志远)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。