

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2018.04.014

水平轴潮流能发电装置结构对其水动力性能的影响

王葛¹, 潘京大¹, 张兴东¹, 李广建¹, 王兵振^{1,2}

(1. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004; 2. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘 要: 为研究水平轴潮流能发电装置结构对其水动力性能的影响, 运用格子玻尔兹曼 (LBM) 方法, 建立水平轴潮流能发电装置的数值模拟分析模型, 对水轮机在不同尖速比工况下的水动力性能进行模拟。将模拟结果与同工况水池拖曳实验得到的数据相对比, 二者捕获能系数误差在 2 % 左右, 验证了 LBM 方法的可行性和准确性。在此基础上利用 LBM 方法研究机舱和立柱结构对水轮机特性的影响, 得到其对水轮机捕获效率的影响规律。

关键词: 水平轴潮流能发电; LBM; 水动力性能; 捕获效率

中图分类号: TK730.3; P742; P743.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2018)04-0475-06

Influence of engine room and column on the hydrodynamic performance of horizontal axis tidal current energy generating device

WANG Ge¹, PAN Jing-da¹, ZHANG Xing-dong¹, LI Guang-jian¹, WANG Bing-zhen^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: In order to give out the effect of structure on the horizontal axis tidal hydrodynamic performance device, Lattice Boltzmann (LBM) method was used to establish the numerical simulation model of the horizontal axis tidal current energy generator, and the hydrodynamic performance of the turbine under different tip speed ratio conditions was simulated. The simulation results were compared with the data obtained from the towing experiment in the same working condition, and the results show that the error of the acquisition energy coefficient is about 2 %. The feasibility and accuracy of the LBM method were verified. The influence of the structure of engine room and column on the characteristics of hydraulic turbine was studied by LBM method, and the influence of the structure on the efficiency of the turbine was obtained.

Keywords: horizontal axis tidal current energy power generation; LBM; hydrodynamic performance; capture efficiency

潮流能是一种绿色可再生的清洁能源, 我国的潮流能资源比较丰富, 沿岸潮流资源理论平均功率可达 13.95 GW (施伟勇等, 2011)。与其他可再生能源相比, 潮流能具有以下几个特点: 1) 较强的规律性和可预测性; 2) 功率密度大, 能量稳定; 3) 利用形式通常是开放式的, 对海洋环境造成的影响小 (Fraenkel, 2002; Bahaj et al, 2003)。

潮流能发电与风力发电有很多的相似之处,

利用海流冲击水轮机带动其转动, 将海水的动能转换为机械能, 再经由发电机发电。潮流能发电装置根据其透平机械的轴线与水流方向的空间关系可分竖轴式和水平轴式两种结构 (游亚戈等, 2010)。由于水平轴式发电系统具有效率高, 自启动性能较好的特性, 逐渐变成研究的焦点。

水平轴水轮机代表类型较多, 主要包括英国 MCT (Marine Current Turbines) 公司联合多家机构

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家海洋局可再生能源专项资金项目 (GHME2011GD03)。

作者简介: 王葛 (1975-), 博士, 教授, 主要从事潮流能发电装置及水动力性能数值模拟研究。电子邮箱: wangge@ysu.edu.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

研制的 SEAGEN、爱尔兰的 OPEN-HYDRO、挪威 Hammerfest Strom 公司的 Blue Concept、美国的 Verdant, 加拿大的 Clean Currents 等 (白杨等, 2016)。相较于欧美发达国家, 国内开展潮流能发电研究的时间较晚, 目前由于国家重视以及相应政策的扶持, 我国潮流能发电领域也得到蓬勃发展, 但依旧未实现规模化和商业化, 主要是科研院所和高校在实验室进行研究 (王世明等, 2016)。中海油研究总院联合哈尔滨工程大学成功研制“海能 II”潮流能发电装置, 其搭载 2 台 100 kW 机组, 转换效率 34 % 左右。东北师范大学成功研制 20 kW 桁架底潮流能发电装置。浙江大学研制的 60 kW 漂浮式潮流能发电装置在上海完成安装, 且成功发电, 转换效率可达 39.26 % (张理等, 2016)。

随着计算机技术的快速发展, 计算流体动力学 (CFD) 迅速成为研究水轮机内部流动及优化水轮机结构的重要手段。但其仍存在收敛率低, 可扩展性差, 对计算机硬件资源要求较高等缺陷 (Sehonbom et al, 2007)。相较于传统的 CFD 方法, LBM 方法具有数值稳定性高, 精确度高, 计算方法简单直接等优点。且随 LBM 不断发展完善, 其在工程领域的应用越来越广泛, 一些高校已经针对翼型流场进行模拟, 并取得了不错的成果 (徐超, 2010; 张勇, 2006; Wu et al, 2009)。

为探索水轮机结构对其水动力性能的影响。本文运用 LBM 流体分析方法, 使用 Profili 和 SolidWorks 建立水平轴潮流能发电装置的三维分析模型, 利用 Xflow 软件分析模型的水动力性能。并借助水池拖曳实验验证了 LBM 分析方法的有效性。在此基础上研究了机舱直径, 形状和支撑立柱的直径及其相对叶轮平面距离对水轮机水动力性能的影响规律。

1 建立数学模型

1.1 物理模型

采用双叶片结构水轮机。依据国家海洋技术中心选取单一 NACA63424 翼型, 如图 1 所示。

确定水轮机叶片数目为 2, 直径为 0.8 m, 以额定工况下获得最大捕获能系数为目标, 经 MATLAB 软件计算求得各个叶片截面的弦长及扭角分布。



图 1 NACA63424 翼型

叶片本身结构复杂, 除翼型截面的弦长各不相同外, 每个截面都有自己确定的扭角, 结合 Profili 软件、SolidWorks 软件进行三维实体建模。将叶片划分为 15 个翼型截面, 根据截面弦长和扭角参数, 利用 Profili 翼型软件分别将每个翼型截面的二维图形绘出, 坐标点导出为 txt 格式文件, 利用三维建模软件 SolidWorks, 通过坐标变换, 并旋转相应的扭角, 最后对 15 个翼型截面进行放样拟合得到叶片的三维模型, 如图 2 所示。

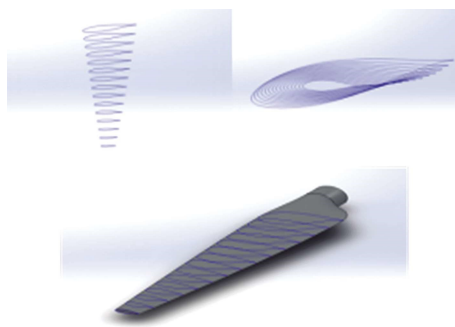


图 2 叶片三维模型

根据发电模型参数进行轮毂、机舱以及支撑立柱的三维建模并装配, 装配好的三维全尺寸模型如图 3 所示。

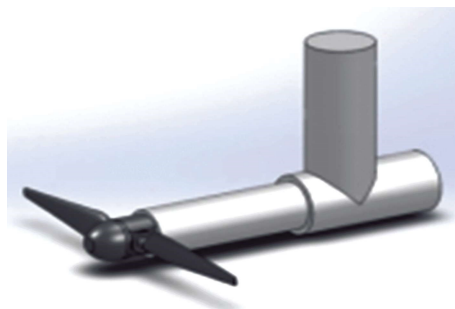


图 3 水平轴潮流能发电装置三维模型

1.2 边界条件的设置

根据实验的工况进行边界条件的设置: 虚拟风洞大小设置为 (12 m, 4 m, 4 m), 考虑重力加速度大小为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 入口处边界条件来流速度设置为固定值 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 介质设置为水, 仿真时间设

置为 2 s, 调整克朗数使稳定值参数保持在 0.2~0.3 之间, 为减少计算机工作量, 提高工作效率, 格子精化采用自适应精化方法, 远场格子粗细对水轮机的水动力性能影响较小, 故选择尺寸大一些的格子, 近场近壁面采用精细格子方式细化格子从而得到较准确的水轮机水动力性能参数, 格子之间的过渡选择 5 层。通过改变水轮机旋转速度, 来得到不同的尖速比下所对应的功率及捕获能系数等参数。

2 模拟结果及实验验证

2.1 模拟结果

模拟得到各组模型的转矩, 并运用捕获能系数的计算公式 (Tony Burton et al, 2007) :

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V_1^3 A} \quad (1)$$

其中 C_p 为捕获能系数; V_1 为来流速度; P 为叶轮获得能量的功率 ($P = \text{转矩} \times \text{转速}/9550$); A 为叶轮扫略面积; ρ 为来流密度; 可以得到相应的水轮机的捕获能系数。通过 origin 软件进行拟合, 得到捕获能系数随叶尖速比的关系曲线如图 4 所示。

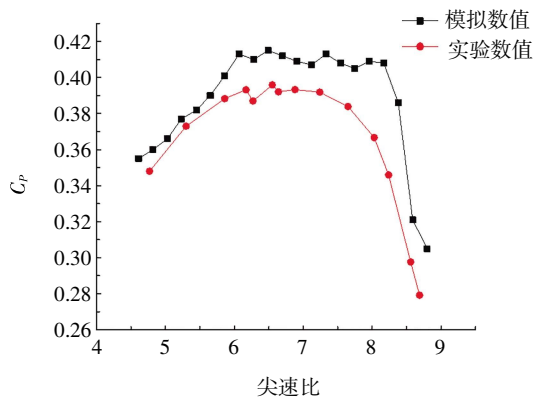


图 4 实验数值和模拟数值的对比

可见叶尖速比为 6.5 左右时, 叶轮的捕获能系数取得最大值, 表明此时叶轮吸收海水能量的效率达到最大值, 该叶尖速比称为翼型的最佳叶尖速比; 当叶尖速比继续提升且不超过 8 时, 叶轮的捕获能系数可以维持在较高的水平, 而当叶尖速比超过 8 时, 叶轮的捕获能系数骤然下降, 因为此时叶轮旋转速度很高, 在来流速度不变的情况下, 攻角会变得很小, 导致升力系数和升阻比系数变小, 且此时升力方向与垂直轴夹角很小,

这就使得升力在水平方向上的分力变得很小, 导致驱动力矩快速下降, 从而捕获能系数迅速降低。

2.2 实验验证

直径 0.8 m 水轮机拖曳水池实验: 该水平轴潮流能发电模型实验利用拖曳水池开展, 实验系统如图 5 所示。

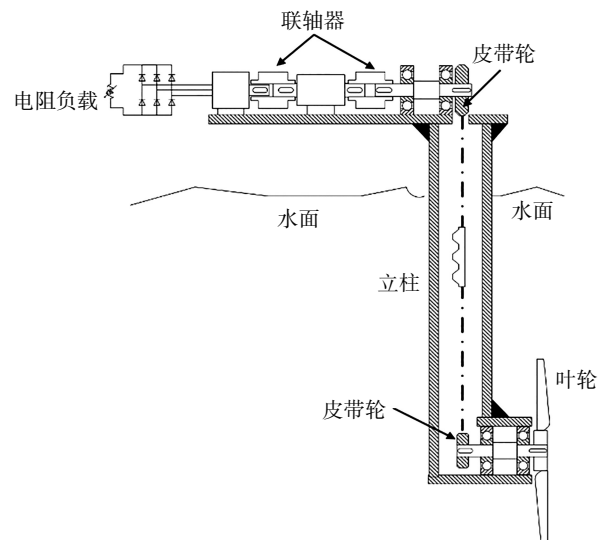


图 5 模型实验系统组成

实验方案: 将水平轴潮流能发电装置固定在水池拖车上, 拖车拖动水轮机发电模型在水中运动, 受到相对水流的冲击, 水轮机模型叶轮开始转动, 通过主轴、皮带轮和皮带等传动机构带动一定的负载 (发电机和电阻); 在实验过程中测量叶轮输出的转矩和转速 (王兵振 等, 2013)。在输入能量不变的情况下 (依靠水池拖车运动速度实现), 改变叶轮的负载来控制叶轮转速, 以得到不同尖速比工况下的各项实验数据。实验场所位于天津大学船舶拖曳水池, 水池长 140 m, 宽 7 m, 水深 3 m, 拖车最大拖曳速度为 2.0 m/s。图 6 为实验现场图。



图 6 水轮机拖曳水池实验

将实验测定数据通过 origin 软件进行拟合, 得到捕获能系数与尖速比的关系曲线如图 4 所示。

对比图 4 中的模拟结果与实验结果,可以看出在整个测定的尖速比范围内, Xflow 软件模拟数值要比实验数值略高,这是由于数值模拟在理想的状态下运行计算,而在实验中,模型要受到摩擦,自由液面,水池壁面,空化现象等因素影响,从而使附近流场产生变化,驱动力矩减小,故捕获能系数降低。且实验设备本身的不确定性和测量误差以及实验模型存在制造误差和表面粗糙度影响,模拟数值高于实验数值属于正常现象。模拟数值与实验数值的捕获能系数误差在 6 % 左右,属可接受范围。整体来看,数值模拟结果与实验结果吻合良好,验证了利用 LBM 模拟方法研究潮流能水平轴发电装置的可行性与准确性。

3 机舱形状及机舱直径对水轮机性能的影响

3.1 机舱直径参数对水轮机特性的影响

共设计十五组仿真模拟,机舱直径范围取叶轮直径的 15 %~50 %,即 120~400 mm,每组模拟机舱直径差值为 20 mm。支撑立柱中心线到叶轮平面的距离均固定为 560 mm,立柱直径 150 mm,虚拟风洞三维尺寸分别取为 (12 m, 4 m, 4 m),介质设置为水,来流速度维持在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 固定不变,叶轮旋转速度为 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。部分三维模型如图 7 所示。

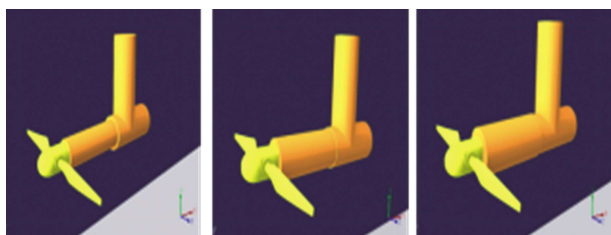


图 7 部分数值模型示意图

模拟得到各组模型的转矩,并运用公式 (1) 计算得到捕获能系数。通过 origin 软件进行拟合,如图 8 所示,其中 $k = \text{机舱直径}/\text{叶轮直径}$ 。

由图 8 可知,当 k 小于 0.25 时,随着 k 的增大,水平轴发电装置的捕获能系数均匀降低,基本呈线性变化;当 $0.25 < k < 0.3125$ 时,捕获能系数急剧下降,机舱对于水流的阻塞作用凸显;当 k 大于 0.3125 时,捕获能系数随机舱直径的增大而降低,但减小速率明显较前一阶段小很多,曲线平缓。

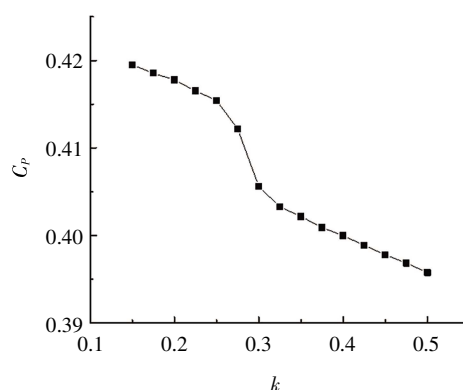


图 8 捕获能系数随机舱直径变化关系

因此,机舱的存在会使水轮机的捕获能系数有所降低,在考虑的直径参数范围内,最大可以使其能量利用效率下降 3 %,当机舱直径小于叶轮直径的 1/4 时,水轮机运行效率较高。

3.2 机舱形状对水轮机特性的影响

常见的机舱有两种形式,一种为圆柱状,一种为机舱头部和尾部椭圆过渡,针对这两种机舱形状设计仿真模拟,研究不同形状机舱对于水轮机水动力性能的影响。图 9 所示为圆柱形机舱,机舱直径选为 240 mm,支撑立柱距离叶轮平面距离为 560 mm,立柱直径 150 mm,图 10 所示为椭圆形机舱,椭圆短轴半径为 120 mm,长轴半径为 240 mm,机舱头部与尾部椭圆参数一致。

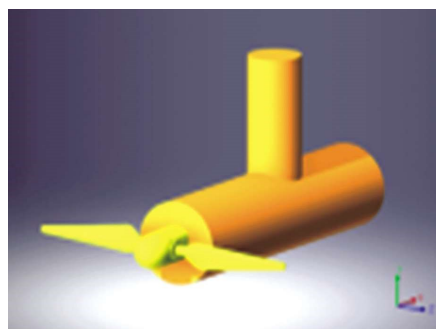


图 9 圆柱形机舱

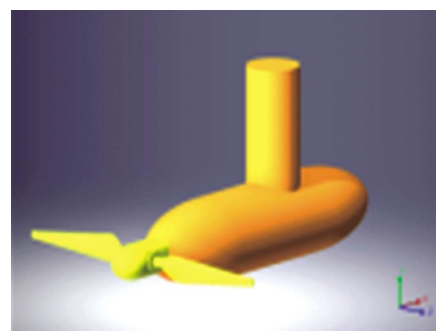


图 10 椭圆形机舱

选取尖速比范围为 4.61~8.80, 对两种有不同结构机舱的发电装置模型进行数值模拟, 并利用贝茨理论公式 (1) 计算得到相应工况下的捕获能系数, 经 origin 软件拟合后如图 11 所示。

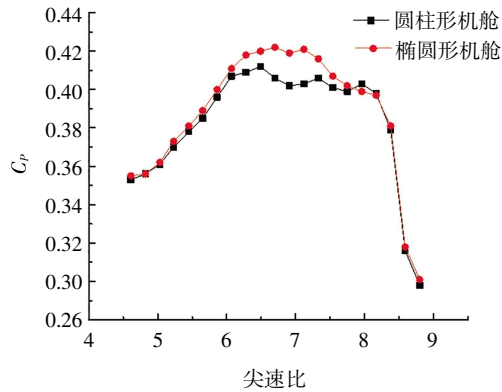


图 11 两种机舱尖速比和捕获能系数的变化关系

可见, 在测定的尖速比范围内, 椭圆形机舱捕获能系数略高于圆柱形机舱, 且越靠近最佳尖速比, 两者的差别越是明显, 最大值相差 1%, 因此椭圆形机舱对水轮机的捕获效率影响较小。

4 支撑立柱对水轮机性能的影响

对于支撑立柱来说, 其直径和立柱中心线与叶轮平面间的距离是对发电装置影响最大的两个因素, 在此运用正交法设计模拟方案 (立柱与叶轮直径比处于 0.15~0.3 间, 平均取值 7 组, 中心线距叶轮距离与叶轮直径比处于 0.35~1.05 间, 平均取值 8 组)。仿真模型的叶轮直径为 0.8 m, 为降低机舱参数对仿真结果的影响, 将机舱直径设置为 120 mm, 来流速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 叶轮转速维持在 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变。部分模拟模型如图 12 所示。模拟得到各组模型转矩, 并运用公式 (1) 计算得捕获能系数。通过 origin 软件进行拟合, 如图 13 所示, 其中 m = 立柱直径/叶轮直径, n = 中心线距叶

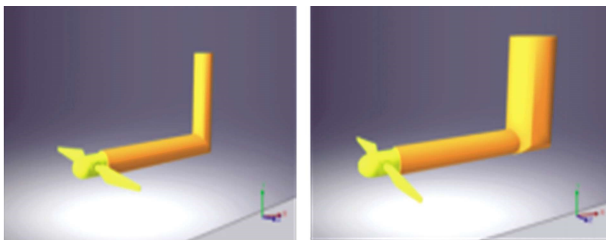


图 12 数值模型

轮距离/叶轮直径。

由图 13 可见, 当 n 为定值时, 随 m 值的增大, 曲线图略有起伏和交叉, 但整体趋于下降, 即随着支撑立柱直径的增大, 水轮机的捕获能系数会不断降低; 当 m 值一定时, 随 n 值的增大, 捕获能系数也呈递增趋势, 即立柱中心线距离叶轮平面的距离越远, 水轮机受到的干扰就会越小, 捕获能系数也随之升高。

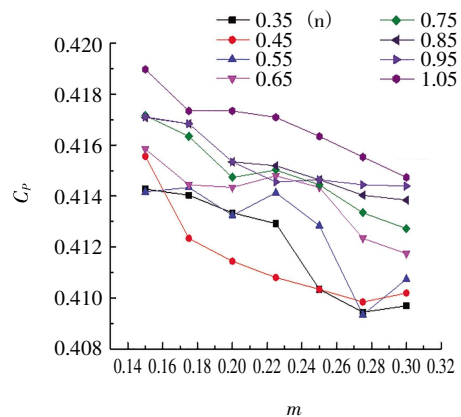


图 13 捕获能系数变化关系曲线图

5 结论

(1) 使用 Xflow 软件对水轮机的水动力性能进行了数值模拟仿真研究, 数值模拟结果与实验数据间的误差在 6% 左右, 吻合较好, 验证了 LBM 方法的可行性和准确性。

(2) 数值模拟结果表明, 随着机舱直径增大, 叶轮的捕获能系数随之降低, 当直径参数小于叶轮直径的 1/4 时, 水轮机可以高效率运行; 相较于圆柱形机舱, 椭圆形机舱可以有效提升潮流能发电装置的捕获效率; 支撑立柱距离叶轮平面越远, 直径越小, 水轮机的发电效率越高。

参 考 文 献

- Bahaj A S, Myers L E, 2003. Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production. *Renewable Energy*, 28(14): 2205-2211.
- Fraenkel P L, 2002. Power from marine currents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy*, 216(1): 1-14.
- Sehnbom A, Chantzidakis M, 2007. Development of a hydraulic control mechanism for cyclic Pitch marine current turbines. *Renewable En-*

ergy, 4(32): 662—679.

Tony Burton, 等著. 武鑫, 等译. 2007. 风能技术. 北京: 科学出版社.

Wu J, Shu C, 2009. Implicit velocity correction-based immersed boundary lattice Boltzmann method and its applications. *Journal of Computational Physics*, 228(6): 1963–1979.

白杨, 杜敏, 周庆伟, 等. 2016. 潮流能发电装置现状分析. *海洋开发与管理*, (3): 57–63

施伟勇, 王传崑, 沈家法, 2011. 中国的海洋能资源及其开发前景展望. *太阳能学报*, 32(6): 913–923.

王兵振, 张巍, 夏增艳, 等. 2013. 水平轴潮流能叶轮性能仿真模型研究. *海洋技术*, 32 (3): 110–113.

王世明, 任万超, 吕超, 2016. 海洋潮流能发电装置综述. *海洋通报*, 35

(6): 601–608

徐超, 2010. 基于格子 Boltzmann 方法的海流能水轮机翼型叶片水动力特性研究. 青岛: 中国海洋大学.

游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等. 2010. 海洋能发电技术的发展现状与前景. *电力系统自动化*, 34(14): 1–12.

张理, 李志川, 2016. 潮流能开发现状、发展趋势及面临的力学问题. *力学学报*, 48 (14): 1019–1032.

张勇, 2006. 基于 Lattice Boltzmann 方法的翼型绕流数值模拟. 西安: 西北工业大学.

(本文编辑: 宋雪莲)

向本期载文的审稿专家致谢

本期《海洋通报》共发表论文 14 篇。这些论文的发表与 36 位专家的认真审读、详查核实、推敲分析和中肯评价是分不开的。特向诸位专家表示诚挚敬意和衷心感谢!

本期载文的审稿专家名单如下 (以姓氏笔画为序):

于 非 中国科学院海洋研究所

王义刚 河海大学

王收军 天津理工大学

王宗灵 国家海洋局第一海洋研究所

王喜年 国家海洋环境预报中心

邓岳文 广东海洋大学

叶属峰 国家海洋局东海分局

冯学钢 华东师范大学

吕咸青 中国海洋大学

吕振波 山东省海洋资源与环境研究院

仵彦卿 上海交通大学

孙才志 辽宁师范大学

孙 军 天津科技大学

孙 亮 中国科学技术大学

纪忠萍 广东省气象台

李才文 中国科学院海洋研究所

李四海 国家海洋信息中心

李圣法 中国水产科学研究院东海水产研究所

李 伟 浙江大学

李绍武 天津大学

李 琪 中国海洋大学

李瑞杰 河海大学

杨立中 西南交通大学

吴惠仙 上海海洋大学

何海伦 国家海洋局第二海洋研究所

狄乾斌 辽宁师范大学

宋志尧 南京师范大学

张广海 中国海洋大学

林勇刚 浙江大学

侍茂崇 中国海洋大学

侯志强 华侨大学

秦 伟 中国科学院烟台海岸带研究所

高伟明 河北师范大学

郭卫东 厦门大学

黄 勇 河海大学

樊彦国 中国石油大学