

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.008

舟山潮流能示范工程水轮机组选址与阵列优化

张继生¹,王 雅¹,唐子豪¹,范文彰¹,张田田²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2. 中国长江三峡集团公司,北京 100038)

摘要:通过 OpenTidalFarm 开源代码建立浙江舟山潮流能示范工程海域的水动力数值模型,结合实测数据对其进行验证。模型中通过增加局部底摩擦的方法概化了潮流能水轮机对水动力环境的影响,利用迭代算法快速优化水轮机阵列。结果表明,阵列优化后的舟山潮流能示范工程水轮机组提取的潮流能比其初始布局时提高了 15.2%,说明水轮机布局对潮流能提取量有很大的影响。

关键词:潮流能;水轮机;舟山海域;葫芦岛;阵列优化;OpenTidalFarm

中图分类号:P743.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)03-0240-06

Site selection and layout optimization of turbines in the Demonstration Project of Zhoushan Tidal Stream Energy

ZHANG Jisheng¹, WANG Ya¹, TANG Zihao¹, FAN Wenzhang¹, ZHANG Tiantian²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The hydrodynamic model is established in the sea area of the Zhoushan Tidal Stream Energy Demonstration Project. The proposed model is based on the open source code OpenTidalFarm and verified by the observed data. In this model, the effect of tidal stream turbine is approximated by a locally-increased bottom friction and the turbines layout is optimized by the iterative algorithm and adjoint method. The result shows that the tidal current energy extracted by the optimized array is 15.2% higher than that of initial regular array, which can be a reference for the development and utilization of tidal current energy in the Demonstration Project of Zhoushan Tidal Stream Energy.

Key words: tidal stream energy; tidal stream turbine; Zhoushan sea area; Hulu Island; layout optimization; OpenTidalFarm

潮流能作为一种重要的海洋资源和清洁可再生能源,其开发和利用已成为国家可持续发展战略的重要组成部分^[1-2]。水轮机是利用潮流能发电的一种能源获取装置,其发电方法类似于风力发电,被形象地比喻为“水下风车”^[3]。水轮机组的选址和布局方式对潮流能的提取影响很大^[4],因此水轮机组选址与阵列优化是国内外潮流能发电场建设的重要环节^[5]。

潮流能水轮机组的选址需要先评估当地潮流能资源,常见的 2 种方法分别是基于动力分析的 Garrett 方法^[6],以及基于能通量的 Flux 方法^[7]。此外,还有应用较少的 Farm 方法和郑志楠方法^[8]。对于水轮机组的阵列优化主要有人工优化方法与自动优化方法。人工优化方法利用了设计者的直觉与经验设计布局,准确度高,但选择方案少。如 Divett 等^[9]提出利用 Gerris 自适应网格流动求解,通过比较 15 个水轮机组成的 4 个不同阵列,发现最好的水轮机阵列布局为交错排列,这种安排可比水轮机的正常排列多获得 54% 的能量。另一种基于遗传算法的自动优化方法,是通过比较数千种水轮机组备选方案求出最佳布局,然而此类方法国内外都鲜有研

基金项目: 国家自然科学基金(51479053);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0461);海洋可再生能源专项资金项目(GHME2015GC01)

作者简介: 张继生(1979—),男,教授,主要从事潮流能利用工程研究。E-mail:jszhang@hhu.edu.cn

引用本文: 张继生,王雅,唐子豪,等. 舟山潮流能示范工程水轮机组选址与阵列优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):240-246.
ZHANG Jisheng, WANG Ya, TANG Zihao, et al. Site selection and layout optimization of turbines in the Demonstration Project of Zhoushan Tidal Stream Energy[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(3):240-246.

究。目前 Funke 等^[4]编写的 OpenTidalFarm 软件(开源代码),通过基于梯度的遗传算法,成功优化了英国彭特兰湾潮流能水轮机场中的 128 台水轮机的布局,且优化后水轮机组提取的潮流能比初始值提高了 24%。

舟山海域蕴藏着丰富的潮流能资源,约占整个浙江省的 54%^[10]。为了开发舟山潮流能资源,中国长江三峡集团公司承担并开展了舟山潮流能示范工程。舟山潮流能示范工程是国家海洋可再生能源资金项目,目标是建成中国首个兆瓦级潮流能示范工程。普陀山岛与葫芦岛间的水道是示范工程的一部分,有着良好的潮流能开发条件,其水深约 20~60 m,最大流速超过 1.7 m/s^[11],表层大潮平均功率密度范围为 1.0~1.7 kW/m²,局部区域超过 2.0 kW/m²。利用 Flux 方法计算可得该水道的资源可开发量为 1.98~3.23 MW,而用 Garret 方法估算则该水道的资源总量为 5.33~6.08 MW^[12]。

基于上述背景,应用 OpenTidalFarm 建立舟山潮流能示范工程海域潮流动力数学模型。OpenTialFarm 基于 Ubuntu 操作系统运行,适用于大型水轮机阵列的研究,同时它拥有高效的计算能力以及优越的算法,可以使水轮机阵列自动优化。利用实测资料验证模型,在水道间选择合适的水轮机场址,并摆放水轮机组,计算得出最佳水轮机组布局,对舟山潮流能示范工程海域的潮流能开发利用具有一定的参考价值。

1 二维潮流数学模型

1.1 控制方程

采用 OpenTidalFarm 搭建二维潮流动力数学模型,该模型采用的潮流动力控制方程为非线性浅水方程^[4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} - \nu \nabla^2 \mathbf{u} + g \nabla \eta + \frac{c_b + c_a(m)}{H} \|\mathbf{u}\| \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(H\mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$H = \eta + h$$

式中: $\mathbf{u}$ ——垂向平均速度; t ——时间; η ——自由表面位移; h ——静水水深; H ——总水深; c_b ——自然条件下的底部摩擦阻力系数; c_a ——由于水轮机引起的附加底部摩擦力; g ——重力加速度; ν ——黏度系数; m ——水轮机设计参数,包括位置与调节参数。

1.2 研究范围及网格划分

根据潮流能示范工程附近海域的潮流环境,以及现有的实测资料,在确保计算区域边界效应对该海域无影响的前提下,确定模型的计算范围为 122.295°E~122.568°E 和 29.848°N~30.160°N。模型采用非等距三角形网格进行单元划分,逐层加密,外海边界的网格步长约为 500 m,加密海域最小网格步长为 5 m,模型网格节点数为 16 646 个,单元总数为 34 076 个,研究区域网格如图 1 所示。

1.3 边界条件和参数选择

外海边界由潮汐驱动,开边界根据 TPX08-atlas 全球潮汐模型提供的 8 个主要分潮 Q1、U1、P1、K1、N2、M2、S2、K2 确定潮汐条件,内陆及岛屿边界定义为无滑移边界,法向流速为零。本模型选用统一的糙率系数 0.002 5,黏度系数 10 m/s²,且为了算法稳定,边界的黏度系数设为 100 m/s²^[13]。

2 模型验证

在研究区域附近有 5 个流速观测站(P1~P5)和葫芦岛潮位站(B),具体位置见图 2。

整个潮流验证时间为 2013 年 8 月 16—25 日,包含了大、中、小潮,潮位验证见图 3,流速和流向验证分别见图 4 和图 5。

从水位验证结果来看,计算值与实测值基本一致,计算得出的高、低潮位出现的时间与实测值基本一致。从流速、流向验证结果来看,各个测点的流速和流向计算值与实测值吻合较好,相位偏差较小,流速过程与实测

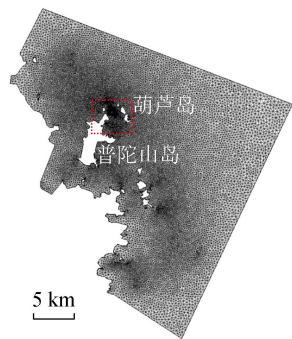


图 1 计算区域网格

Fig. 1 Mesh of the computational domain

值基本一致。然而舟山海域岛屿众多,水深变化明显,潮流动力十分复杂,研究区域水深达 60 m,且模型中采用同一糙率系数,这是计算值与实测值存在误差的主要原因。因此,可以认为模型模拟的潮流场较好地反映了研究海域的潮流运动特征。

3 水轮机组的场址选择

需要考虑许多因素,模型中取流速与水深作为主要参考条件。首先,潮流流速高的海域是放置水轮机组的必要条件,高流速会带来更多的潮流能;其次,适合水轮机的水深为 20 ~ 50 m,当水深低于 20 m 时,水轮机容易暴露在空气中,高于 50 m 时,会带来更多的安装与维护成本。潮流模拟起始时间为 2013 年 8 月 16 日 0 时,时长 288 h,时间步长为 30 s。模拟结果见图 6,图 6(b)中坐标为 UTM 坐标系 51 带坐标,红色区域为流速较高区域,图中流速为时均流速,白色曲线为流线。

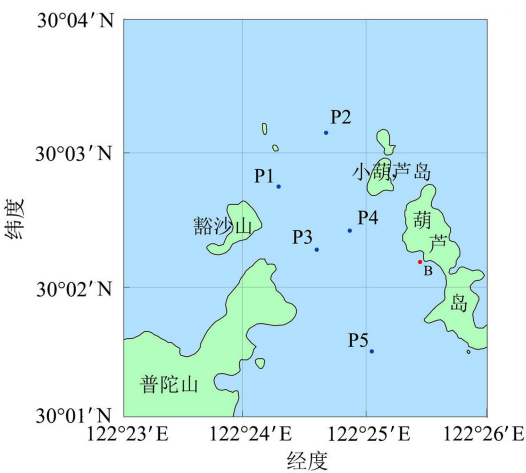


图2 流速观测站(P1~P5)与葫芦岛潮位站(B)
Fig.2 Current velocity observation stations (P1~P5) and Hulu Island tidal station (B)

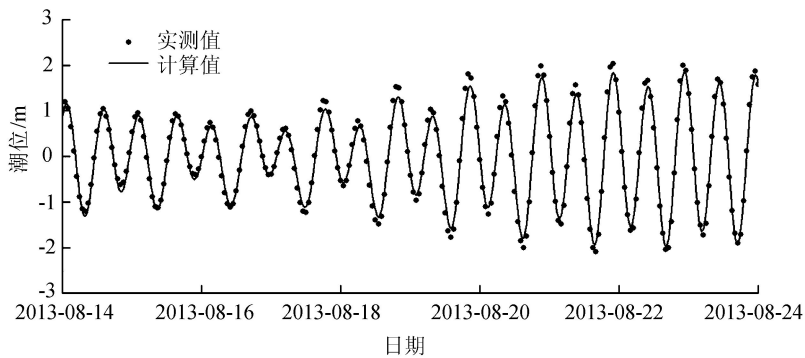


图3 潮位验证
Fig.3 Comparison of tide amplitude

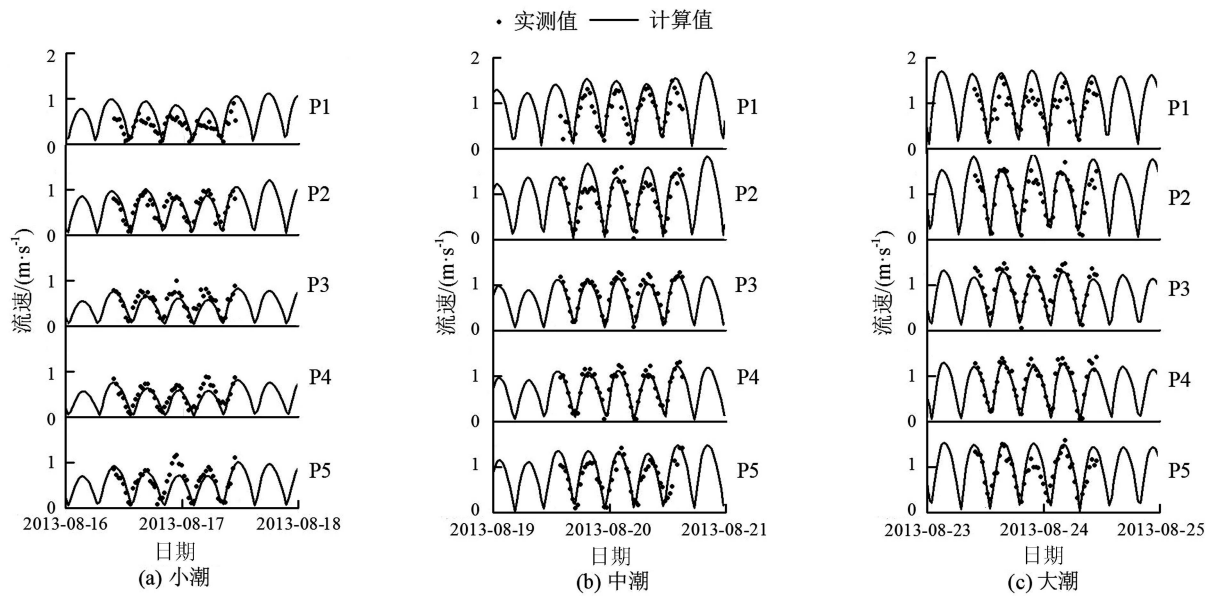


图4 流速验证
Fig.4 Comparison of current velocity

结果表明,场 B 与场 C 在模拟时间内一直具有较高的流速。场 C 处最高流速 2.15 m/s,场 B 处最高流速 2.00 m/s,场 C 处流速比 B 处高,但由于场 C 水深较大,接近 60 m,不利于水轮机安装及维修,因此选择场 B 作为最终水轮机组场址。场 B 大小为 250 m×250 m,西南角坐标为(442 850,3 322 730)。

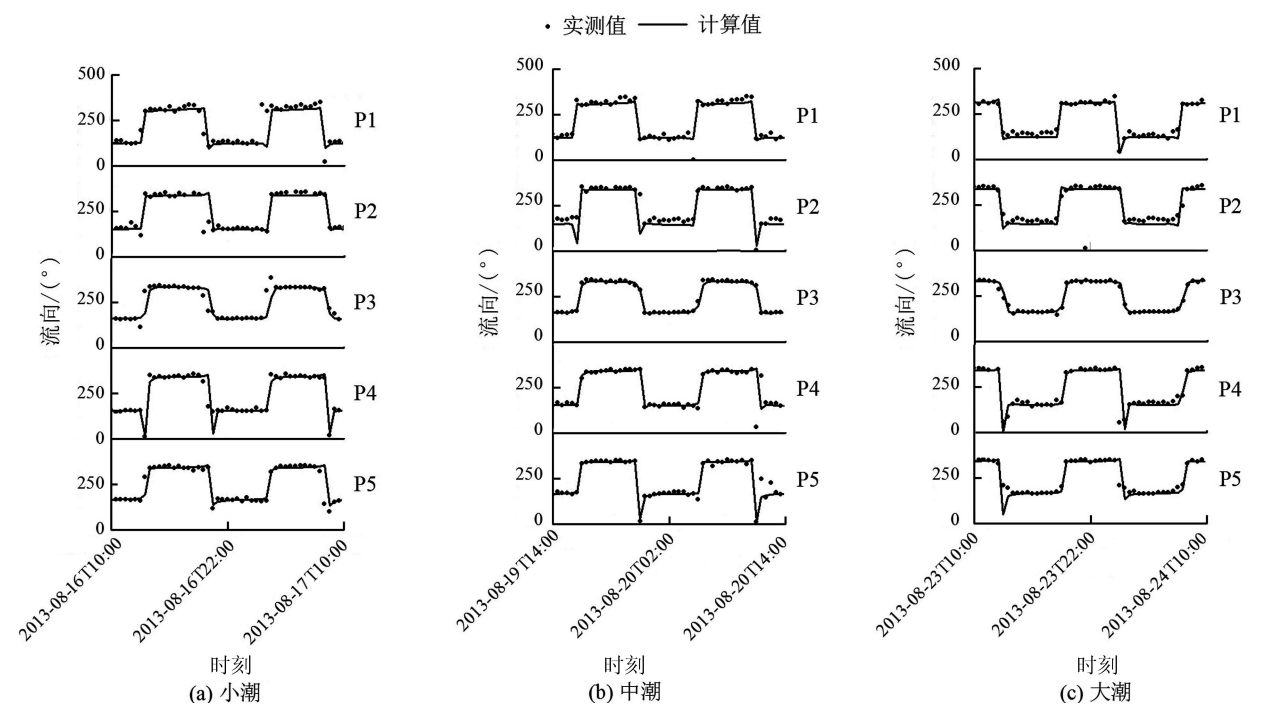


图 5 流向验证

Fig. 5 Comparison of current direction

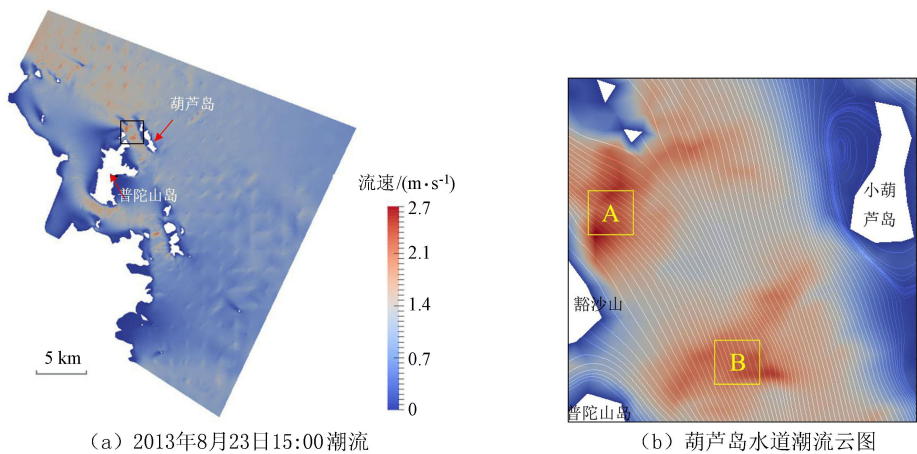


图 6 潮流数值模拟结果

Fig. 6 Numerical results of tidal stream

4 水轮机组的阵列优化

4.1 水轮机的概化

水轮机对流体的作用力通过在一个小区域上增加底部摩擦来概化。为了将水轮机模块应用于基于梯度的优化模型,水轮机的概化函数在水轮机位置上必须可微,因此相关的摩擦函数可由凸函数构成。一个一维的凸函数包括中心点位置和半径长度,因此代表 (x_i, y_i) 位置水轮机对流体的附加底部摩擦函数由摩擦系数乘以 2 个方向的凸函数:

$$C_i(m)(x,y)=K_i\psi_{x_i,y_i,r}(x,y) \tag{2}$$

式中: C_i ——单台水轮机对水流的摩擦力; (x,y) ——水轮机位置; r ——水轮机半径; K_i ——第 i 台水轮机的摩擦系数; i ——阵列中水轮机编号。

在偏微分方程中的 $c_i(m)$ 由 N 台水轮机(假设水轮机大小一致,即 r 相同)的摩擦函数总和得出:

$$c_i(m)=\sum_{i=1}^N C_i(m) \tag{3}$$

4.2 水轮机组优化数值模型

以水轮机提取的潮流能总量为优化目标进行阵列优化。基于 Vennell^[14] 和 Sutherland 等^[15] 的研究,水轮机组时均提取的潮流能总量方程可表示为

$$J(\boldsymbol{u}, m) = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{\Omega} \rho c_a(m) \|\boldsymbol{u}\|^3 dx dt$$

(4)

考虑到稳定, J 可简化为

$$J(\boldsymbol{u}, m) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho c_a(m) \|\boldsymbol{u}\|^3 dx$$

(5)

式中: J ——水轮机组时均提取的潮流能总量; T ——模型模拟时长; ρ ——水流密度; Ω ——研究区域。

以非线性浅水方程为约束的目标函数为

$$\begin{cases} \max_{z, m} J(z, m) \\ \text{s. t. } F(z, m) = 0 & b_i \leq m \leq b_u & g(m) \leq 0 & z = (\boldsymbol{u}, \eta) \end{cases}$$

(6)

式中: $F(z, m)$ ——偏微分算子,由 m 与对应的参数 z 确定; z ——浅水方程的解; b_i, b_u ——设计参数的上限约束和下限约束,用于强制保持水轮机组布置在规定区域内; $g(m)$ ——水轮机之间的最小距离。

此模型采用基于梯度的优化算法^[4],其利用变分法的伴随矩阵算法技术,能有效地计算出功率梯度。此算法使用带有参数的目标函数的一次或多次导数来更新在每个迭代的参数空间中的位置,并且会重新评估再迭代,直到最佳条件出现。相比无梯度算法,这种有梯度的算法能够使迭代次数显著减少,可以适用于大规模阵列的优化问题。

4.3 优化结果

模型中水轮机半径统一设置为 10 m, K 设置为 12,最小水轮机间距限制为 30 m^[4]。初始在场 B 中布置一个规则的 3×3 水轮机组,经过迭代优化后,水轮机阵列的最终优化结果如图 7(b) 所示。图 7 中坐标零点为场 B 西南角。由计算结果可知,初始布局下的单台水轮机功率为 0.59 MW,优化后布局下的单台水轮机功率为 0.68 MW,比初始值提高了 15.2%。优化后的水轮机阵列形状似垂直于流速方向的栏杆,且左右距离紧凑,增加了水轮机间流速,能够提取更多的潮流能。潮流能水轮机安装后的潮流流场变化见图 8,由图 8 可知水轮机后方流场的流速明显变小,其中后方 D 点(442 795,3 323 325)流速由 1.12 m/s 减小到 0.38 m/s,减小了 66.1%。

5 结 语

基于舟山潮流能示范工程,利用 OpenTidalFarm 建立二维数值模型模拟工程区域及周围的潮流动力特征,通过实测潮流资料对模拟结果进行了验证。结果显示潮位、流速及流向的计算值与实测值吻合良好,表明该模型模拟结果合理可信,能较准确地模拟舟山附近海域的潮流环境。在此基础上,选择合适的水轮机组安放场地。此外,在模型中通过增加局部底摩阻来概化潮流能水轮机组,结合潮流特征对水轮机整列进行优化,研究水轮机布局对潮流能提取效率的影响。优化后水轮机组的潮流能提取效率比初始规则布局时提高了 15.2%,说明水轮机布局对潮流能提取量有很大的影响。研究结果对舟山潮流能示范工程海域的潮流能开发利用具有一定的参考价值。

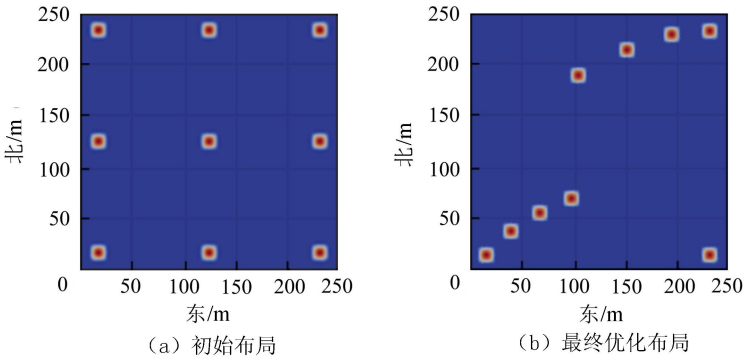


图7 水轮机组初始布局与最终优化布局

Fig.7 Initial regular layout of tidal stream turbines and the optimized layout

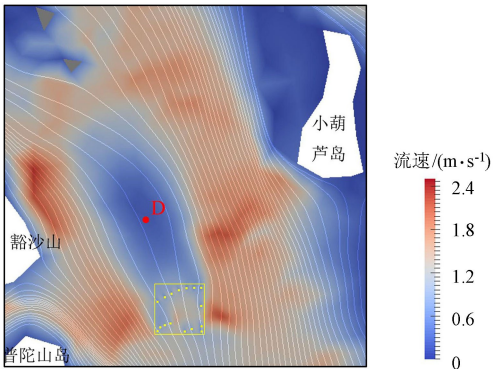


图8 水轮机组后方流场的流速变化情况

Fig.8 Velocity changing behind turbines

参考文献:

[1] 杨阳,陈永平. 江苏沿海潮差能和潮流能区域分布研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(1): 76-80. (YANG Yang, CHEN Yongping. Research on regional distribution of tidal wave energy and tidal stream energy in nearshore Jiangsu province[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(1): 76-80. (in Chinese))

[2] 许寅,王培红. 潮汐能利用及江苏省潮汐能发展概况[J]. 上海电力, 2010, 23(3): 188-190. (XU Yin, WANG Peihong. Tidal energy utilization and development of tidal energy in Jiangsu Province[J]. Shanghai Electric Power, 2010, 23(3): 188-190. (in Chinese))

[3] 郑金海,张继生. 海洋能利用工程的研究进展与关键科技问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5):450-455. (ZHENG Jinhai, ZHANG Jisheng. Recent advances and key technologies in marine energy utilization engineering[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(5):450-455. (in Chinese))

[4] FUNKE S W, FARRELL P E, PIGGOTT M D. Tidal turbine array optimisation using the adjoint approach[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 658-673.

[5] 李林杰. 潮流能发电场水轮机排布对流场影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[6] 吕新刚, 乔方利. 海洋潮流能资源估算方法研究进展[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(1):98-108. (LYU Xingang, QIAO Fangli. Advances in study on tidal current energy resource assessment methods[J]. Advance Marine Science, 2008, 26(1):98-108. (in Chinese))

[7] 韩家新. 中国近海海洋可再生能源[M]. 北京: 海洋出版社, 2015:30-58.

[8] 张亮, 尚景宏, 张之阳,等. 潮流能研究现状 2015:水动力学[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2):1-15. (ZHANG Liang, SHANG Jinghong, ZHANG Zhiyang, et al. Tidal current energy update 2015: hydrodynamics [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2):1-15. (in Chinese))

[9] DIVETT T, VENNELL R, STEVENS C. Optimization of multiple turbine arrays in a channel with tidally reversing flow by numerical modelling with adaptive mesh[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2013, 371(1985): 20120251.

[10] 陈耕心. 浙江沿岸和长江口区潮流能源及其开发利用[J]. 东海海洋, 1991, 9(1): 13-18. (CHEN Gengxin. The reserve, distribution, exploitation and utilization of the tidal current energy along Zhejiang nearshore and Changjiang estuary[J]. Donghai Marine Science, 1991, 9(1): 13-18. (in Chinese))

[11] GAO Peng, ZHENG Jinhai, ZHANG Jisheng, et al. Potential assessment of tidal stream energy around Hulu Island, China[J]. Procedia Engineering, 2015, 116(1):871-879.

[12] 吴亚楠,武贺,封哲. 普陀山-葫芦岛水道潮流能资源评估[J]. 可再生能源, 2017, 35(10):1566-1573. (WU Yanan, WU He, FENG Zhe. Assessment of tidal current energy in Putuoshan-Huludao[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10): 1566-1573. (in Chinese))

[13] FUNKE S W, KRAMER S C, PIGGOTT M D. Design optimisation and resource assessment for tidal-stream renewable energy farms using a new continuous turbine approach[J]. Renewable Energy, 2016, 99:1046-1061.

[14] VENNELL R. The energetics of large tidal turbine arrays[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 210-219.

[15] SUTHERLAND G, FOREMAN M, Garrett C. Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island[J]. Journal of Power and Energy, 2007, 221(2): 147-157.

(收稿日期:2017 - 11 - 15 编辑:张志琴)