

山东省周边海域潮流能资源评估

李程, 高佳, 李文善, 李欢, 蔡仁翰, 杨益

(国家海洋信息中心 天津 300171)

摘要:采用基于三角形可变分辨率网格系统的三维海洋模型,模拟得到 2012—2013 年山东周边海域的潮汐潮流。对该海域潮流能进行模拟研究,结果表明:通过检验发现 SELFE 对山东周边海域的潮汐潮流具有较强的模拟能力。平均流速、最大流速、最大可能流速与能流密度分布一致,较大的区域都发生在渤海海峡和成山头海域,年平均能流密度分别达到 600 W/m^2 和 500 W/m^2 ;选取了 13 个能流密度较大的重点断面,对山东省潮流能资源进行评估,山东省潮流能蕴藏量总量为 1 202.9 MW,资源较为丰富。其中,渤海海峡诸水道潮流能蕴藏量为 914.2 MW,占山东省潮流能总资源储量的 76%;成山角断面潮流能蕴藏量为 190.3 MW,占山东省潮流能总资源储量的 16%。综合以上计算结果及环境因素,文章推荐开发潮流能的海域为渤海海峡诸水道(尤其是北隍城北侧水道)和成山角海域。潮流能的开发利用对于解决能源短缺、改善全球生态环境和维持可持续发展具有重要意义,能够为我国维护海洋权益、迈向深蓝提供科学依据。

关键词:山东海域;潮流能;数值模拟

中图分类号:P731.2

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)01-0075-06

Tidal Current Energy Resource Assessment in Offshore of Shandong Province

LI Cheng, GAO Jia, LI Wenshan, LI Huan, CAI Renhan, YANG Yi

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: Tides and tidal currents simulation during 2012—2013 was constructed to explore the tidal current energy in offshore of Shandong Province, by using the three-dimensional ocean model Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation (SELFE), which is based on the unstructured, variable resolution triangular mesh system. The validation results show that the model is accurate and robust comparing with the observations. According to the statistics of the simulation results, the larger mean flow velocity, maximum velocity and the maximum probable velocity all occur mainly at the channels in Bohai Strait and Chengshantou Area, which is similar to the tidal current energy flux density distribution. The average tidal current energy flux density at channels in Bohai Strait and Chengshantou area is about 600 W/m^2 and

收稿日期:2016-06-31;修订日期:2016-11-30

基金项目:海洋公益性行业科研专项项目(201505018-2);国家科技支撑计划项目(2014BAB12B02);天津市科技支撑计划项目(14ZCZDSF00012)。

作者简介:李程, 助工, 硕士, 研究方向为浅海动力学研究, 电子信箱:licheng_que@163.com

通信作者:高佳, 博士, 研究方向为浅海动力学研究, 电子信箱:gaojia109@163.com

500 W/m² respectively. Thirteen vertical sections with larger tidal current energy flux density were analyzed to assess that the total tidal current energy in offshore of Shandong Province. The results show that the tidal energy resource in Shandong is abundant with the total number of 1 202.91 MW, at the forth place in China. The tidal energy at the channels in Bohai Strait is 914.2 MW, 76% of the total energy; and the tidal energy at Chengshantou area is 190.3 MW, 16% of the total energy. Combined with the natural environment, the channels in Bohai Strait (especially Beihuangcheng northern area) and Chengshantou area are the recommended areas to exploit the tidal current energy.

Key words: Offshore of Shandong Province, Tidal current energy, Numeric simulation

潮流能是一种已经得到广泛研究的可再生能源,研究主要集中在探讨潮流能开发装置和潮流能资源计算方法。20 世纪 90 年代的英国^[1]、美国^[2]和加拿大^[3]等欧美国家都曾对自己国家的沿岸潮流能资源评估方法进行过研究。2009 年,欧洲海洋能中心发布了第一版潮流能资源评估指南^[4],对评估方法、数据要求及统计方法都进行了详细的描述。在我国,早在 1989 年,王传崑等^[5]基于实测的流速资料提出了中国沿海农村潮流能资源的区划。结果显示我国潮流能资源分布很不均衡,其中,东海能源最为丰富,沿岸理论平均功率高达 1 096 万 kW 占全国总量的 78.6%。2009 年,王传崑和芦苇^[2]对中国沿海潮流能进行了整体的评估,根据现有的潮流资料进行统计,全国沿岸潮流能资源平均理论总功率为 1 396 万 kW。浙江省为各地中分布最多的,其次为台湾、福建、山东沿岸。

山东省北临渤海,东临黄海,岸线曲折,地形复杂,海域辽阔,潮流资源丰富。同时,山东半岛有 3 000 km 余的海岸线,占全国海岸线总长的 1/6,具备了开发潮流能的条件。鉴于前人对山东省潮流能蕴藏量的估算是基于实测资料,存在时长短、空间分辨率不足的缺点,本文将利用较新的水动力模型 SELFE 对山东省近岸海域进行高精度的数值模拟,统计分析该海域潮流能流密度特征,针对特定水道进行潮流能蕴藏量和技术可开发量的估算。

1 资料与方法

1.1 模型和资料介绍

水动力模型采用 SELFE^[7],该模型采用非结构

化网格,可以对重点关注区域进行网格加密,提高模拟效率;采用半隐式算法,可以适当加大时间步长,提高模拟效率。

对不同分辨率海图采用 ArcGIS 进行拼接,结合实地调查获得的水深和地形资料,采用反距离加权法制作计算区域水深数据(图 1)。

本文中模型验证的水位资料来源于成山角验潮站(122°18'E, 37°09'N)2013 年 4 月 1 日—30 日逐时水位资料;流速流向数据来源于老铁山水道海域的调查站位(121°33'E, 38°06'N)的 2013 年 5 月 1 日 0 时至 2013 年 5 月 2 日 1 时的连续 25 h 逐时潮流资料。

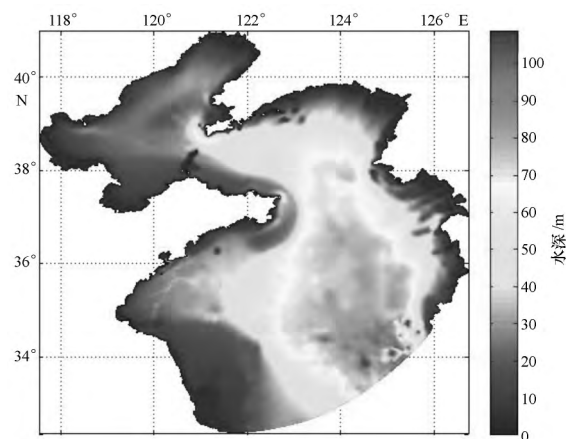


图 1 计算区域水深

1.2 模拟方法介绍

采用 SELFE 模型的 V3.1dc 并行版本。模型设定的计算区域包括了整个山东沿岸海域(图 2)。计算区域面积为 42.3 万 km²,网格 74 233 个,节点 38 992 个,空间分辨率在开边界处可达 8 800 m,空

间分辨率在重点关注区域山东沿岸海域最高可达 200 m。

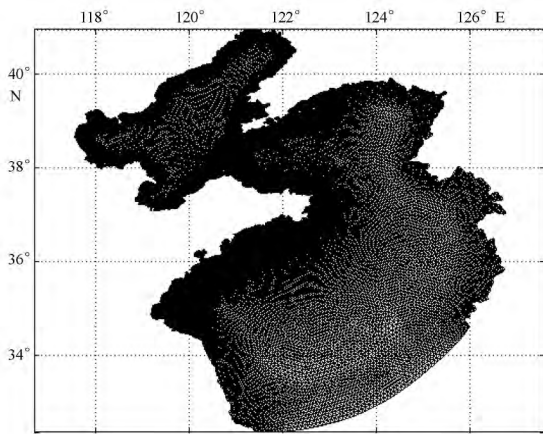


图 2 计算区域网格配置

模型的开边界设置在黄海,节点数位 66 个,计算所用的潮汐调和常数来自于伴随同化的渤海、黄海、东海潮汐模式模拟结果。时间步长设定为 60 s,每 1 h 输出一次计算结果。模式计算时间为从 2012 年 12 月 1 日开始,到 2013 年 12 月 31 日结束。

1.3 模拟数据的有效性检验

对模型输出的水位数据和成山角验潮站 2013 年 4 月 1—30 日逐时水位资料进行对比分析,相对误差分别为 7.9%,相关系数为 0.97(图 3)。其中,* 为验潮站资料,实线为模拟计算结果。

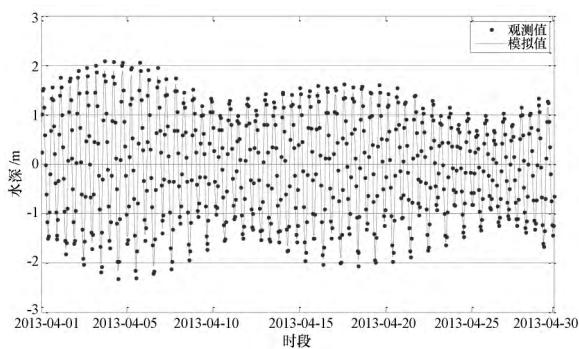


图 3 水位验证结果

对模型输出的流速流向数据和老铁山水道海域的调查站位的 2013 年 5 月 1 日 0 时至 2013 年 5 月 2 日 1 时的连续 25 h 逐时潮流资料进行对比分析,流速、流向的相对误差分别为 9.2%、6.4%,流

速、流向的相关系数分别为 0.93、0.94(图 4 和图 5)。其中,* 为实测资料,实线为模拟计算结果。

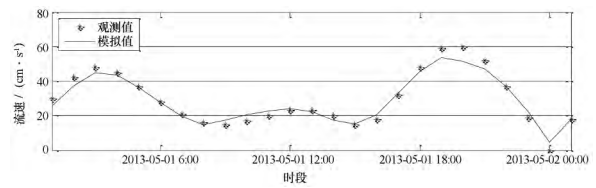


图 4 流速验证结果

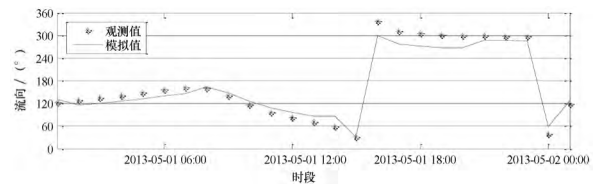


图 5 流向验证结果

通过对比可以看出水位、潮流模拟结果与实测资料结果较好的符合,基本正确的模拟了水位、潮流的变化趋势。总的来说,误差均在可接受范围内。可以认为 SELFE 模型的模拟结果能够反映山东沿海海域的潮汐潮流特征。

2 潮流能评估结果分析

本文利用数值模拟的结果统计山东海域年平均流速、最大可能流速、年平均能流密度,并选取特定水道对潮流特征量进行统计、计算潮流能蕴藏量以及技术可开发量。计算均以垂向平均流速作为基础数据。

2.1 平均流速和最大流速

本文没有考虑温盐等影响,采用正压模型,模型中往往是表层潮流流速最大,并随着深度的增加逐渐呈指数性衰减。海水垂向流速(仅考虑边界层摩擦)可以用近似公式计算:

$$v(z) = v_0 \left(\frac{z}{d} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

式中: v_0 为海水表层流速; z 为所求流速的海水所在的深度; $v(z)$ 为深度 z 处的海水的流速; d 为海水深度; α 为经验常数,一般取 7 或者 10。

通过对流速进行时间平均(一般为 1 年)得到年平均流速,并且统计了每个网格点的年最大流速,绘制成平均流速与最大流速分布图(图 6 和图 7)。

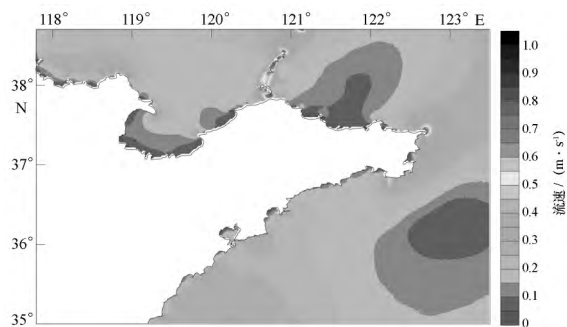


图6 平均流速分布

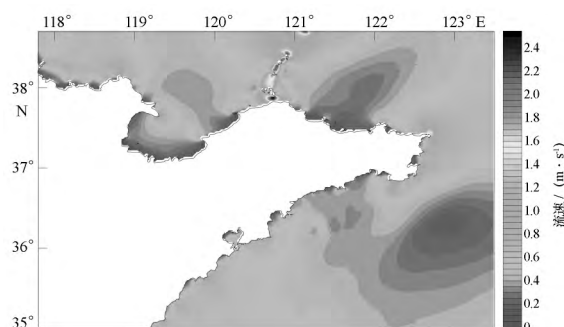


图8 最大可能流速分布

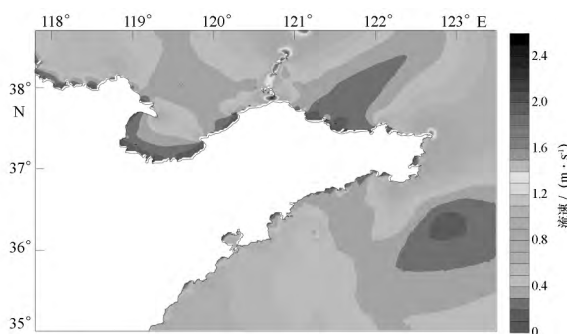


图7 最大流速分布

由图7可以看出,流速较大区域主要集中在近岸海域和渤海海峡庙岛群岛附近的各个水道。其中以成山头附近和渤海海峡诸水道的流速最大,其平均流速可超过0.9 m/s,局部的平均流速甚至可达1.0 m/s。

2.2 最大可能流速

按照《海港工程规范》的要求,最大可能流速的公式为:

$$W_{\max} = 1.295W_{M_2} + 1.254W_{S_2} + W_{K_1} + W_{O_1} + W_{M_4} + W_{M_{S_4}}$$

式中: W_{M_2} 、 W_{S_2} 、 W_{K_1} 、 W_{O_1} 、 W_{M_4} 、 $W_{M_{S_4}}$ 分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 M_{S_4} 分潮潮波的潮流椭圆长半轴。对模型输出结果进行潮流调和分析,得到各分潮的椭圆要素,并根据上述公式计算得到模拟区域的最大可能流速分布(图8)。

从图8可以看出,最大可能流速分布与2.1节中平均流速分布以及最大流速分布基本一致。

2.3 能流密度计算

能流密度,是单位时间通过单位映流面积的潮流能量。平均能流密度 P 计算公式为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{T} \int_0^T v^3 dt \quad (2)$$

式中: v 为 t 时刻的流速(m/s); T 为评估周期; ρ 为海水密度,这里取常数 $1\,025\text{ kg/m}^3$ 。

依据式(2),对山东海域平均能流密度进行计算,再统计分析得到山东海域年平均能流密度,图9为平均能流密度分布。

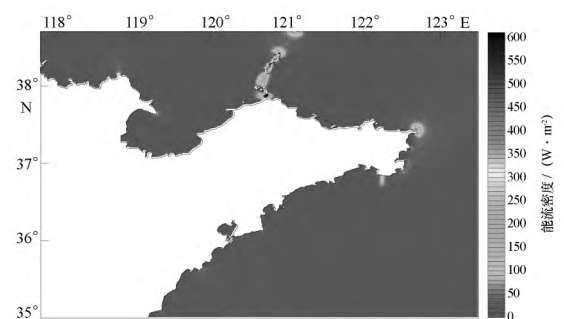


图9 平均能流密度分布

总的来看,能流密度分布与流速的分布相似。渤海海峡诸水道能流密度最大,可达 600 W/m^2 ;其次为成山角海域,能流密度可达 500 W/m^2 ;再次为三山子岛附近(山东半岛南部)、黄河口海域以及胶州湾口,能流密度可达 120 W/m^2 。

2.4 重点区域的选取

根据前面计算的潮流特征和年平均能流密度的分布情况,将最大可能流速大于 1.0 m/s 的区域标记出来,便于更清晰地讨论(图10)。选取渤海海峡各水道、成山头附近、三山水道、黄河口附近、胶州湾口、琅琊附近和岚山附近等多个区域作为重点研究区域,并选取了重点区域中13个能流密度较大的断面,根据流速数据计算出最大垂向平均流速点

的位置和角度^[8](表 1)。

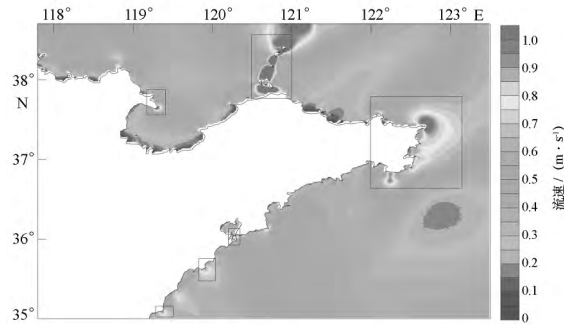


图 10 代表区域分布

表 1 代表区域截面选取的位置及参数

水道	出现最大流速		最大流速	截面	平均能
	点的位置		角度	角度	流密度
	经度 E°	纬度 N°	/ (°)	/ (°)	/ (W·m ⁻²)
成山角	122.675 9	37.428 0	107.6	17.6	536
三山水道	122.306 3	36.823 6	91.5	1.5	183
登州水道	120.752 6	37.887 2	220.3	130.3	435
长山水道	120.715 7	37.991 7	97.1	7.1	297
大钦水道	120.794 5	38.280 8	271.8	181.8	308
小钦水道	120.854 1	38.348 7	333.9	243.9	342
北隍城北	120.926 8	38.403 2	300.6	210.6	279
北砣矶水道	120.743 3	38.208 7	100.3	10.3	218
南砣矶水道	120.770 0	38.150 0	115.6	25.6	654
胶州湾口	120.280 0	36.030 0	283.2	193.2	118
黄河口	119.320 0	37.640 0	44.5	134.5	91
琅琊	119.910 0	35.620 0	219.5	129.5	113
岚山	119.370 0	35.080 0	215.7	125.7	86

2.5 潮流能蕴藏量及理论可开发量

潮流能蕴藏量是通过某个截面的潮流能量^[8]。理论计算公式为:

$$P = \frac{\rho}{2T} \int_t^{t+T} \int_0^L \int_{-H}^0 V^3 dy dz dt$$

式中: P 是指周期 T 内潮流能的平均功率; t 初始时刻, T 为评估周期,取一年; L 水道宽度; H 水深; ρ 为海水密度,取 $1\,025\text{ kg/m}^3$ 。

本文在垂向平均流速最大的地方设置断面,断面方向与潮流椭圆的主轴方向垂直。对于潮流能理论可开发量的计算选用 Flux 法^[9],有效影响因子

(SIF)取值参考美国电力研究协会^[10]在进行潮流能评估时的 SIF 取值取为 15%进行计算。

依据能流密度分布情况,我们选取了重点区域中 13 个能流密度较大的断面,这些断面潮流能蕴藏量较大,经过计算,得到这 13 个断面的潮流能蕴藏量、可开发潮流能功率及资源类别(表 2)。

表 2 山东省潮流能蕴藏量分布

断面位置	断面宽度/km	平均水深/m	潮流能蕴藏量/MW	可开发潮流能功率/MW
成山角	6.4	46.9	190.3	28.6
三山子水道	6.2	28.8	49.6	7.4
登州水道	6.6	23.6	96.7	14.5
长山水道	2.1	20.0	36.8	5.5
南砣矶水道	1.9	20.8	20.8	3.1
北砣矶水道	10.7	32.0	135.5	20.3
大钦水道	2.3	35.0	30.6	4.6
小钦水道	2.0	44.5	60.6	9.1
北隍城北侧	13.3	45.8	533.2	80.0
胶州湾口	3.2	18.7	15.0	2.3
黄河口	3.8	12.5	9.2	1.4
琅琊	2.0	18.8	8.9	1.3
岚山	2.3	22.3	15.7	2.4

其中,资源类别依据最大流速(v_m)划分,一类资源区 $v_m \geq 3.06\text{ m/s}$;二类资源区 $2.04 \leq v_m < 3.06\text{ m/s}$;三类资源区 $1.28 \leq v_m < 2.04\text{ m/s}$ 。根据结果对这 13 个重点区域进行了资源类别的统计(表 3)。

表 3 山东省重点区域潮流能资源类别统计

分类	区域
一类资源区	
二类资源区	成山角、登州水道、长山水道、大钦水道、小钦水道、北隍城北侧
三类资源区	三山子水道、南砣矶水道、北砣矶水道、胶州湾口、黄河口、琅琊、岚山

从表 2 和表 3 中可以看出,山东省潮流能资源储量较为丰富,总和为 $1\,202.9\text{ MW}$ 。其中,成山角、登州水道、长山水道、大钦水道、小钦水道、北隍城北侧 6 个区域属于二类资源区;三山子水道、南砣

矾水道、北碇矾水道、胶州湾口、黄河口、琅琊、岚山 7 个区域属于三类资源区。

渤海海峡诸水道蕴藏量最为丰富,北隍城北侧、北碇矾水道和登州水道潮流能蕴藏量分别为 533.2 MW、135.5 MW 和 96.7 MW,再加上长山水道、南碇矾水道、大钦水道和小钦水道的蕴藏量,使得渤海海峡诸水道潮流能资源储量达 914.2 MW,占山东省潮流能总资源储量的 76%。成山角断面潮流能蕴藏量为 190.3 MW,占山东省潮流能总资源储量的 16%。其他几个断面潮流能蕴藏量较小,其和仅为 98.4 MW,占山东省潮流能总资源储量的 8%。

3 结论

本文基于水动力模型 SELFE,对山东省海域进行了高精度的数值模拟,很好地重现了该海域潮汐潮流的特征。有效地解决了实测资料稀缺的问题,是一种有效地潮流能资源评估的方法。

山东海域年平均能流密度分布与流速的分布相似。渤海海峡诸水道能流密度最大,可达 600 W/m^2 ;其次为成山角海域,能流密度可达 500 W/m^2 ;再次为三山子岛附近(山东半岛南部)、黄河口海域以及胶州湾口,能流密度可达 120 W/m^2 。

本文选取了 13 个能流密度较大的重点断面,对山东省潮流能资源进行评估。得到结论如下:

山东省潮流能蕴藏量总量为 1 202.9 MW,在全国各省、市、自治区排名第 4,其中,渤海海峡诸水道蕴藏量最为丰富,北隍城北侧、北碇矾水道和登州水道潮流能蕴藏量分别为 533.2 MW、135.5 MW 和 96.7 MW,再加上长山水道、南碇矾水道、大钦水道和小钦水道的蕴藏量,使得渤海海峡诸水道潮流能资源储量达 914.2 MW,占山东省潮流能总资源储量的 76%。成山角断面潮流能蕴藏量为 190.3 MW,占山东省潮流能总资源储量的 16%。

推荐开发潮流能的海域为渤海海峡诸水道和

成山角海域。渤海海峡诸水道自然条件较好,尤其是北隍城北侧能流密度高、截面宽、储量大、潮差较小、冬季不结冰,而且这些区域附近存在很多海岛,这些都很有利于开发利用,是最具有开发价值的海域。

参考文献

- [1] 戴庆忠. 潮流能发电及潮流能发电装置[J]. 东方电机, 2010 (2).
- [2] 王传崑, 芦苇. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 52—129.
- [3] CORNETT A. Inventory of Canada's marine renewable energy resources[C]//Ottawa: National Research Council and Canadian Hydraulics centre, 2006.
- [4] Black & Veatch Consulting, Ltd. Assessment of Tidal Energy Resource[M]. Marine Renewable Energy Guides, 2009.
- [5] 王传崑, 陆德超. 中国沿海农村海洋能资源区划[M]. 北京: 国家海洋局科技司, 水电部科技司, 1989, 1—127.
- [6] PAISH O, FARENKEL P, GAVA P. The exploitation of tidal and marine currents, european commission, non-nuclear energy-JOULE II, wave energy project result, directorate-general science, research and development[C]//Luxembourg: Office for Official Publications of European Communities, Brussels Luxembourg, 1996.
- [7] ZHANG Y, BAPTISTA A M. SELFE: a semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation[J]. Ocean Modelling, 2008, 21(3): 71—96.
- [8] 侯放, 于华明, 鲍献文. 基于高分辨率数值模型的舟山群岛海域潮流能资源分析[C]//中国可再生能源学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
- [9] 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.
- [10] HAGERMAN G, POLAGYE B, BEDARD R, et al. Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in stream energy conversion (TISEC) device[C]//Report EPRI—TP—001 NA Rev 3. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2006.