舟山西堠门水道潮流能资源评估 及发电站选址

张 洁1,纪棋严1*,左军成2,彭腾腾1,苏 毓1,孙永钊1

(1. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院,浙江 舟山 316022;2. 上海海洋大学 海洋科学学院,上海 201306)

摘 要:利用海洋模式 FVCOM(Finite Volume, primitive equation Community Ocean Model)建立了一个高分辨率的舟山附近海域潮汐潮流模型,通过与历史实测资料进行对比验证了模型模拟结果的可靠性,表明模型可以较好地描述舟山附近海域潮汐潮流运动状况。基于模型的模拟结果,估算与分析了舟山西堠门水道的潮流能资源,结果表明,西堠门水道的潮流以往复流为主,年平均流速和年最大流速分别超过1.2 m/s 和 2.6 m/s,年平均能流密度和年最大能流密度分别超过1.2 kW/m² 和 6.5 kW/m²;西堠门水道的平均流速和平均能流密度存在3 处峰值区,其值大小由西北向东南递增;西堠门水道流速和能流密度的季节分布特征相似,1 月(冬季)的流速和能流密度最大,4 月(春季)和 10 月(秋季)次之,7 月(夏季)最小。结合潮流能发电站选址原则,本文认为册子岛西北岬角处海域可选为西堠门水道潮流能发电站的最佳场址,其总平均功率和有效功率分别为 30.0 MW 和 4.5 MW,与当前已经运行的潮流能发电站相比较,该选址区域的发电能力较为可观,具有极大开发潜力。

关键词:西堠门水道;潮流能;FVCOM;Flux法

中图分类号:P743;TM612 文献标志码:A 文章编号:1671-6647(2022)02-0327-15

doi:10.12362/j.issn.1671-6647.2022.02.014

引用格式:张洁,纪棋严,左军成,等. 舟山西堠门水道潮流能资源评估及发电站选址[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2): 327-341. ZHANG J, JI Q Y, ZUO J C, et al. Tidal current energy resources evaluation and site choosing of power plant in the Xihoumen Channel of Zhoushan[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(2): 327-341.

海水在引潮力的作用下,产生周期性的水平流动叫作潮流,潮流根据流向的变化可以划分为往复式潮流 和回转式潮流两种。往复式潮流是指在一个潮周期内,流向在一条直线上往复一次的潮流,而回转式潮流是 指在一个潮周期内流向不断变化的潮流^[1]。潮流能指潮流做水平运动所具有的动能,一般可理解为单位时 间通过单位面积的潮流动能^[2]。据估算,我国东海沿岸潮流能占全国沿岸潮流资源总量的78.6^{%[3]}。舟山 海域位于浙江省东北部,海域内岛屿众多,岛屿间水道纵横交错,水深流急,蕴藏着丰富的潮流能资源,可占 浙江省沿岸潮流能资源的54.0^{%[4]},其中又以金塘水道、西堠门水道和龟山航门水道等的潮流能资源最为丰 富。舟山海域的潮流能开发利用,可以为海岛的经济发展发挥重要作用,对优化该地区能源消费结构,促进 经济社会的可持续发展具有重大意义^[5]。

收稿日期:2021-04-04

(王 燕 编辑)

资助项目:国家重点研发计划项目——全球高分辨率潮汐潮流数值模式研制(2016YFC1401406);国家社科重大项目——海平面上升对我 国重点沿海区域发展影响研究(15ZDB17);国家自然科学基金项目——东海黑潮锋三维精细结构的变化特征及影响机理研究 (41806004),基于大数据的海一陆资源流动机制与模拟研究(42130402)

作者简介:张 洁(1996一),女,硕士研究生,主要从事潮波动力学、气候与海平面变化方面研究. E-mail: jiezhang_2021@outlook.com * 通信作者:纪棋严(1986—),男,副教授,博士,主要从事近岸海洋数值模拟与资料同化方面研究. E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

舟山海域潮流能资源的相关研究最早开始于 20 世纪 70 年代末。1979 年,高祥帆^①利用舟山西堠门水 道预报的大、小潮期间潮流逐时流速资料,计算出西堠门水道大、小潮的平均能流密度分别为10.68 kW/m² 和 1.33 kW/m²,整个潮周期的平均能流密度为 6.01 kW/m²,西堠门水道的平均理论功率为 60.1×10^4 kW/m²。之后,何世钧^[6]利用实测潮流资料计算出舟山海域主要水道的潮流能总功率密度为 257.28×10⁴ kW/m²。陈耕心^[4]估算出浙江省潮流能理论平均功率为7 090.28 MW,长江口区理论平均功率为 304.88 MW。王智峰等[7]利用连续 26 h 实测潮流资料,采用 Farm 法计算出高亭水道的潮流能理论可开发量为 4.67 MW,灌门水道潮流能理论可开发量为 9.37 MW,采用 Flux 法计算出高亭水道的潮流能理论可开发量 为 5.31 MW, 灌门水道潮流能理论可开发量为 7.92 MW。侯放等[8]利用 FVCOM 海洋数值模型结果对比 分析了最大潮流流速超过 2.5 m/s 的 8 处水道的潮流能分布状况,结果表明,舟山群岛海域重要水道潮流能 理论蕴藏总量约为1400 MW,其中在资源丰富的重要水道的技术可开发总量约为200 MW,最大能流密度 约为 27.24 kW/m²,平均能流密度约为 13.83 kW/m²。王卫远和杨娟^[9]利用 MIKE 21 计算了 2014 年舟山 海域潮流场,统计分析了舟山海域的潮流能平均功率密度和空间分布特征,计算出10个特征断面上潮流能 资源理论蕴藏量约为 25 000 MW。这些关于舟山海域及其各水道的潮流能资源蕴藏量的计算评估表明,舟 山海域的众多水道区域具有较好的潮流能开发前景。虽然潮流能资源丰富程度是开发利用潮流的首要条 件,舟山海域这一条件非常优越,但对舟山海域潮流能的实际开发利用还比较少。原因在于,潮流能的实际 开发利用,除了需要考虑潮流能资源蕴藏量外,还要考虑经济、技术、环境、交通、生活、电网和用户等多方面 因素。已经投入使用且规模比较大的潮流能发电站是位于舟山海域秀山岛周边的 LHD(林东新能源科技股 份有限公司)海洋潮流能发电站,该发电站的发电机组首期装机发电量为1 MW,并于 2016 年 8 月并入电 网^[10]。目前,主要在舟山市岱山县的高亭水道、龟山水道以及位于定海区的摘箬山等海域开展一些潮流能 发电装置的技术研发和阶段性试验[11]。

在潮流能资源丰富海域选择合适的场址是建设潮流能发电站的先决条件,发电站场址选择的好坏对 实现潮流能开发预期目标至关重要^[12]。流速是潮流能发电站选址最重要的因素,流速要大且流向不宜 多变,以往复流最佳。场址所在海域的自然灾害要少,海域地质条件要好,海底地形平坦少起伏,水深条 件适宜。场址还应靠近电力用户或当地电网,以减少铺设线缆和并入电网的成本。此外,潮流能发电站 对海洋环境及交通的不利影响要达到最小,且其选址应该避开主航道,以减少对海上运输的影响^[13]。舟 山海域的众多水道不仅潮流能资源丰富,还受岛屿掩护,海况较平稳,海岸又多为基岩岸,具有优越的开 发环境,这些特征使得开发建设潮流能发电站的场址选择余地较大^[6]。但即使在同一个水道区域,由于 局部条件不同也会对潮流能的分布、发电机组的布置、电站的场址等均产生一定的影响。如何根据海域 的潮流能资源特征及潮流能发电站选址因素选择最优的发电场址,对最大限度发挥潮流能发电机组效益 有着重要意义。

西堠门水道是舟山海域潮流能资源蕴藏量最为丰富的水道之一,具有较好的开发利用前景,如何在 该水道内选择合适的发电场址,需要综合考虑各要素、详细评估该水道的潮流能资源。因此,本文利用高 分辨率的 FVCOM(Finite Volume, primitive equation Community Ocean Model)数值模型对舟山海域进行 潮汐潮流的数值模拟,估算舟山西堠门水道的总体潮流能,分析比较水道内具有开发潜力的场址区域,选 出最优的发电场址,以期为将来开发利用西堠门水道潮流能资源提供参考。

1 研究区域地形

舟山海域西堠门水道(121°51′~121°58′E,30°02′~30°08′N)位于舟山市定海区金塘岛与册子岛之间, 整体呈 NW-SE 走向,长约 7.7 km,平均宽 2.5 km,最窄处宽约 1.9 km;水道内深浅不一,中间深两边浅,水

① 高祥帆.潮流、海流发电.中国科学院广州能源研究所,1979.

深范围约为 30~90 m(图 1)。



2 数值模型建立

舟山海域属于近岸沿海区域,地形复杂,岛屿众多,岸线曲折,选用无结构三角网格的区域海洋模式可以 较好地实现重点关注区域的高分辨率模拟。所以,本文选用 FVCOM 海洋模式对西堠门水道及舟山海域进 行潮汐潮流模拟。FVCOM 是由美国马萨诸塞大学(University of Massachusetts)和伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution)联合开发的无结构三角网格、自由表面、有限体积和三维海洋模 式^[14]。该模式的主要方程包括动量方程、连续方程、盐度扩散方程、温度扩散方程和状态方程,并采用 Mellor-Yamada 2.5 阶和 Smagorinsky 湍封闭方案分别计算水平和垂向混合^[15]。该模式在垂直方向上采用 σ坐标变换,可以更好地拟合复杂的海底地形,被广泛应用于近岸、河口、陆架海和大洋等海域的数值模拟 研究。

本文重点关注区域为西堠门水道海域,但模拟区域包括了舟山群岛、杭州湾、长江口以及部分东海海域(120°06′~124°24′E,28°30′~32°12′N),如图 2 所示。模型计算区域内共有三角形网格节点 51 503 个,三 角形网格单元 96 634 个,模型网格由近岸向外海逐渐稀疏,网格最密集区域是西堠门水道(图 3),该区域的 最小网格步长为 50 m。模型的开边界设在东海海域,采用逐时潮位驱动,该逐时潮位数据是利用俄勒冈州 立大学(Oregon State University)潮汐反演模型(OSU Tidal Inversion Software,OTIS)^[16]后报生成的。本 文建立的模型在垂向上采用均匀的 10 个 σ 层,在近岸潮间带底摩擦系数取 0.001 5~0.002 0,外海及开边界 区域底摩擦系数取 0.000 5。模型采用正压模拟,即将温度和盐度设为常数,不考虑风场和径流等其他条件 的影响。由于潮汐潮流对边界驱动响应很快,所以,模型采用冷启动,即模型网格点的初始水位和流速均为 0。经过调试,将模型的计算时间步长设为 2.0 s,以保证模型稳定运行。模型模拟时间从 2019 年 8 月 30 日 00:00 开始至 2020 年 12 月 31 日 23:00 结束,输出的时间间隔为 1 h 一次,最后用于结果分析的输出时间段 为 2020 年 1 月 1 日 00:00 至 12 月 31 日 23:00。



3 模型结果验证

3.1 观测数据

本文收集了西堠门水道的1个潮流观测点和1个验潮站的实测数据(图1),用于验证模型模拟的潮流和潮 汐的准确性。潮流观测点在西堠门水道附近(121°54′33″E,30°05′40″N),数据时间范围为2020年9月9日00:00 至9月23日24:00,时间间隔为15 min。潮流观测仪器采用美国亚迪仪器公司(Teledyne RDInstruments,Inc.) 生产的 Work House 300 kHz 声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler,ADCP),观测层厚为 2 m。由于观测的海流不仅包含潮流,还有一部分余流,所以对海流数据进行调和分析去掉余流后再与模式结 果对比。验潮站在金塘岛附近(121°54′07″E,30°03′44″N),数据时间范围为2020年3月28日00:00至4月12 日24:00,时间间隔为1 h。潮流观测点和验潮站(图1)的数据均为连续无中断,包含了完整的大潮和小潮过程。

3.2 潮位验证

从金塘验潮站的实测资料与对应时段模型的模拟结果来看,两者吻合良好(图4)。金塘验潮站一天中 出现2次高潮和2次低潮,实测最大潮差、最小潮差分别为3.54 m和0.64 m,平均潮差为2.56 m。该站的潮 位验证结果表明,总体来说模型可以较好地反映金塘附近海域真实的潮位变化。本文的模型设置没有考虑 风场和径流的影响,而实测潮位中除了天文潮还包含了由风、径流等引起的余水位,导致模型在大潮期间模





Fig.4 Validation of the model simulated tidal elevation

拟结果与实测资料相比有一定的误差。

3.3 潮流验证

潮流资料在时间上包含了一个大小潮过程,其中,小潮时间为 2020 年 9 月 10 日,大潮时间为 2020 年 9 月 17 日,将小、大潮期间海水表层(2 m)、中层(18 m)、底层(32 m)潮流的流速、流向与观测资料进行验证,结果(图 5 和图 6)表明,无论大潮期间还是小潮期间,计算潮流与实测潮流在各个时刻均有良好的一致性, 涨落潮段流速的平均相对误差为 6.6%,流向的平均绝对误差为 9.5°。



图 5 小潮期间潮流验证



Fig.5 Validation of the tidal currents of neap tides

Fig.6 Validation of the tidal current of spring tides

图 6 大潮期间潮流验证

4 潮流能资源分析

本文选取了 2020 年全年的模拟结果,主要从潮流流速分布、有效流时分布和能流密度分布这 3 个方面 开展潮流能资源的统计分析。

潮流流速大小直观反映潮流能大小,所以本文从最大涨、落潮流、平均流速和最大流速分布特征方面展 开分析。最大涨、落潮流分别为涨潮、落潮时间段内最大的潮流,一般可以用涨、落急时刻的潮流来表示。最 大涨、落潮流除了流向存在很大差别外,流速大小也会存在较大差异。平均流速指的是一段时间内潮流流速 大小的平均值,反映潮流大小的平均状态。最大流速分布仅考虑流速大小,不考虑流向,从最大流速分布可 以看出海域内最强的流场分布特征。

潮流的流速大小会随时间变化而变化,只有流速大于一定值时,潮流发电装置才能有效地将潮流的动能转换成电能。因此,有效流时指的是潮流能的有效小时数,它是用来统计潮流大于某一阈值的累计时间数^[17]。

能流密度是表征某一海域潮流能量强弱或者潮流资源丰富程度的重要指标^[2],能流密度值越大表明该 处的潮流能量越高,资源越丰富。单位时间内通过单位面积的潮流动能即能流密度(*P*,单位为 W/m²)^[17], 计算式为:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3, \tag{1}$$

式中: ρ 为海水密度,单位为 kg/m³,本文取 1.025×10³ kg/m³; v 为潮流流速,单位为 m/s,为了表征潮流能量的强弱,引入潮流的最大流速 v_{max} 和平均流速 \overline{v} ,分别代入式(1)即可计算出最大能流密度(P_{max})和平均能流密度(\overline{P})。

潮流不仅随时间变化,在垂向空间上也会有差异,即在同一经纬度的点,流速从表层到底层也会有不同。 因此,本文先计算出各点的垂向平均流速,在此基础上,对各月的垂向平均流速进行时间上的平均,作为该月 的平均流速,选取各月份流速的最大值,作为该月的最大流速。参考李庆杰等^[18],本文选取1月、4月、7月 和10月作为冬季、春季、夏季和秋季的代表月份,分析这4个季节的潮流能资源特征。

4.1 潮流流速分析

4.1.1 涨、落急流速分布

本文选取与潮流观测资料对应时间段的大潮期间涨、落急潮流流场,分析西堠门水道最大涨、落潮流速 分布特征。西堠门水道狭窄,潮流为典型的往复流,涨、落潮期间,潮流的主要流向与水道平行。西堠门水道 涨潮以东南流为主,涨急最大流速可达 2.6 m/s(图 7a)。落潮以西北流为主,落急最大流速可达 2.0 m/s(图 7b)。受水道两侧岛屿岸线及地形的影响,西堠门水道册子岛两岬角处流速较大,并且流速高值区都位于水 道东南口。虽然相较而言,涨潮的流速会略大,但无论是涨潮还是落潮,西堠门水道大部分区域流速均较大, 表明水道内大多数区域都有较大的潮流能开发潜力。

4.1.2 平均流速分布

由西堠门水道1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)和10月(秋季)平均流速分布(图 8)可以看出,各月的平均流速空间分布大致相同,水道内部有3处峰值区,峰值区形状类似,峰值区流速大小从西北向东南方向递增,且册子岛西南沿岸海域流速较小。1月(冬季)和10月(秋季)3个峰值区平均流速的最大值从西北向东南均分别为1.0 m/s、1.1 m/s和1.2 m/s,但10月(秋季)的同一等值线包围的范围小于1月(冬季)。4月(春季)和7月(夏季)3个峰值区平均流速的最大值从西北向东南均分别为0.9 m/s、1.1 m/s和1.1 m/s,4月(春季)和7月(夏季)的同一等值线包围的范围大小相似。



图 7 大潮期间涨、落急时刻潮流场分布









Fig.8 Distribution of averaged current velocity in the Xihoumen Channel

4.1.3 最大流速分布

由西堠门水道1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)和10月(秋季)最大流速分布(图9)可以看出,各月的最大流速空间分布大致相同,水道内部有3处峰值区,峰值区形状类似,峰值区流速从西北向东南方向增加,且册子岛西南沿岸海域流速较小。1月(冬季)3个峰值区最大流速的最大值从西北向东南分别为2.2 m/s、2.6 m/s和2.6 m/s。4月(春季)和10月(秋季)3个峰值区最大流速的最大值从西北向东南均分别为2.0 m/s、2.4 m/s和2.4 m/s,但是,4月(春季)同一等值线包围的范围小于10月(秋季)。7月(夏季)3个峰值区最大流速的最大值从西北向东南分别为2.0 m/s、2.2 m/s和2.4 m/s。



Fig.9 Distribution of maximum current velocity in the Xihoumen Channel

由西堠门水道年平均流速和年最大流速分布(图 10)可知,年平均流速和年最大流速空间分布大致相同,水道内部都有 3 处峰值区,峰值区位置相近,同一等值线围成的范围差异较大,峰值区流速大小从西北向 东南方向递增,册子岛西南沿岸海域流速较小。年平均流速的 3 个峰值区的平均流速最大值从西北向东南 分别为 0.9 m/s、1.1 m/s 和 1.2 m/s,年最大流速的 3 个峰值区的最大流速的最大值从西北向东南分别为 2.2 m/s、2.6 m/s 和 2.6 m/s。



Fig.10 Distribution of annual mean current velocity and annual maximum current velocity of Xihoumen Channel

4.2 有效流时分析

本文参考吴亚楠等^[17]计算了 2020 年全年西堠门水道附近海域流速在 0.6~3.5 m/s 的有效流时,其空 间分布如图 11 所示。水道内部有 3 处峰值区,峰值区的有效流时从西北向东南方向递增。3 个峰值区的有 效流时从西北向东南分别为 6 500 h、6 500 h、7 000 h。册子岛西南沿岸海域有效流时较小。西堠门水道大 部分区域的有效流时在 5 500 h 以上(约占全年总时间的 63%,一年按 365 d 计算,共 8 760 h),表明西堠门 水道兼具流速大、有效流时长的特点,潮流能资源蕴藏量大且可开发利用时间较长,具有较高的开发价值。



4.3 能流密度分析

利用式(1)计算西堠门水道1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(冬季)的平均能流密度,结果如图12所示。各月的最大能流密度空间分布与各月的平均流速空间分布相似。1月(冬季)3个峰值区平均能

336

流密度的最大值从西北向东南分别为 0.9 kW/m²、1.3 kW/m² 和 1.7 kW/m²,4 月(春季)和 10 月(秋季)3 个峰值区平均能流密度的最大值从西北向东南均分别为 0.7 kW/m²、0.9 kW/m² 和 1.3 kW/m²,7 月(夏季) 3 个峰值区平均能流密度的最大值从西北向东南分别为 0.7 kW/m²、0.9 kW/m² 和 1.1 kW/m²。



Fig.12 Distribution of monthly mean tidal energy density in the Xihoumen Channel

利用式(1)计算西堠门水道1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(冬季)的最大能流密度,结果如图 13 所示。各月的最大能流密度空间分布与各月最大流速空间分布相似。1月(冬季)3个峰值区最大能流密度的最大值从西北向东南分别为 5.0 kW/m²、8.0 kW/m² 和 10.0 kW/m²,4月(春季) 和 10月(秋季)3个峰值区最大能流密度的最大值从西北向东南均分别为 3.0 kW/m²、6.0 kW/m² 和 7.0 kW/m²,7月(夏季)3个峰值区最大能流密度的最大值从西北向东南分别为 3.0 kW/m²、5.0 kW/m² 和 6.0 kW/m²。

由西堠门水道年平均能流密度和年最大能流密度分布(图 14)可知,年平均能流密度和年最大能流密度 空间分布与年平均流速和年最大流速空间分布相似。年平均能流密度的 3 个峰值区的平均能流密度的最大 值从西北向东南分别为 0.6 kW/m²、0.9 kW/m² 和 1.2 kW/m²,年最大能流密度的 3 个峰值区的最大值从 西北向东南分别为 3.0 kW/m²、5.5 kW/m² 和 6.5 kW/m²。





Fig.14 Distribution of annual mean energy flow density and annual maximum energy flow density of Xihoumen Channel

5 选址和发电前景分析

5.1 潜在场址分析

潮流能蕴藏量丰富程度是潮流发电站选址的首要考虑因素。根据前文对潮流流速、有效流时和能流密 度的分析,西堠门水道有3处峰值区不仅能流密度大且有效流时长,本文在这3处峰值区取3个区域,依次 标记为A(121°53′39″~121°54′28″E,30°04′52″~30°05′40″N)、B(121°54′01″~121°54′45″E,30°03′53″~ 30°04′37″N)和C(121°54′47″~121°55′37″E,30°03′22″~30°04′12″N)(图15),作为潮流能发电站的潜在选 址。结合潮流的选址因素,通过综合比较遴选出在西堠门水道内建设潮流能电站的最佳场址。

区域 B 和 C 处流速较大,潮流能资源优势比较显著,但区域 B 和 C 在主通航区,且离岸较远,不仅影响 通航,还增加潮流能发电站建造的难度和成本。区域 C 附近建有西堠门大桥,受现有通航或跨海桥梁工程 影响,开发利用潮流能会在一定程度上与该海域的交通航运产生冲突,因此不宜建发电站。区域 A 海域附 近流速虽然相对较小,但该区域深度适中(水深为 30~60 m),并且离岸较近,海底地形平坦,地址条件良好, 是该水道内潮流能发电站的最佳场址。



5.2 发电前景分析

能流密度仅代表潮流能的理论蕴藏量,在实际开发过程中只有小部分可以被开发并最终转换成电能。 为更直观给出最佳选址区域 A 的实际可开发潮流能总量,本文在不考虑潮流发电设备对潮流能开发的影响 的前提下,采用 Flux 法^{②③}估算区域 A 的理论可开发量,该方法由 Black & Veath 咨询公司在 2004 年发布 的英国潮能流资源评估报告(简称 BV-04)中提出的,其在估算过程中仅需考虑潮流经过水道的潮流能通量 和有效影响因子 SIF(Significant Impact Factor)。SIF 指在不产生明显的环境或经济影响的前提下,可供开

② Black & Veatch Consulting, Ltd. UK, Europe, and global tidal energy resource assessment, Marine Energy Challenge Report No. 107799/D/2100/05/1. London. 2004.

③ Black & Veatch Consulting, Ltd. Phase II, UK tidal stream energy resource assessment. Marine Energy Challenge Report No.107799/ D/2200/03. London. 2005.

发利用的潮流能占总潮流能资源的百分比。

Flux 法计算公式为:

$$P_{t} = P_{m} \cdot S, \qquad (2)$$

式中,P_t为总平均功率,P_m为平均功率密度,S为垂直潮流方向的水道断面面积。

可供开发利用的有效潮流能功率可表示为总平均功率与有效影响因子的乘积,计算公式为:

$$P_{s} = P_{t} \cdot SIF, \qquad (3)$$

式中, P_s 为有效潮流能功率;SIF为有效影响因子,SIF的取值具有不确定性。在 BV-04[®],Hagerman和 Polagye^[19]、Bryden等^[20]的研究中,SIF的取值分别为20%、15%以及10%。依据文献^[19],本文的SIF取15%。计算得到区域A断面处的年平均能流密度约为0.6 kW/m²,断面面积约为5.0×10⁴ m²,该站的总平均功率和有效潮流能功率分别为30.0 MW和4.5 MW,将有效潮流能功率换算成一年的发电量约为3.9×10⁷ kW・h,约占舟山市2020年城乡居民生活用电量 1.1×10^9 kW・h的36%^[21]。与舟山秀山岛周边海域现有的LHD海洋潮流能发电站首期装机发电量1 MW相比,本文选取的西堠门最佳场址具有较为可观的潮流能发电能力,具有极大开发潜力和实际开发价值。

6 结 论

本文基于 FVCOM 模式建立了舟山海域高分辨率潮汐潮流模型,并利用实测的潮位和潮流数据对模型 的可靠性进行了验证。利用模型结果详细地描述了西堠门水道的潮汐潮流状况,统计分析了流速和能流密 度的分布特征和潮流能有效流时,并获得了潮流能发电场址的最佳位置。主要结论如下:

1) 西堠门水道潮流为往复流, 潮流的流向大致平行于水道, 涨潮流速大于落潮流速。水道内部有3处流速峰值区,峰值区流速大小从西北向东南方向递增, 能流密度空间分布特征与对应流速空间分布特征类似。

2)西堠门水道具有较高的有效流时。水道内大部分区域的有效流时超过 5 500 h,空间分布特征与流速 和能流密度空间分布特征相似。其分布较大区域位于西堠门水道东南部,峰值区域与流速分布区一致。

综合考虑潮流能资源和环境条件,西堠门册子岛西北岬角处可选为西堠门水道最佳发电站场址,其总平均功率和有效潮流能功率分别为 30.0 MW 和 4.5 MW,具有极大开发潜力。

参考文献(References):

- [1] 左军成,杜凌,陈美香,等.海洋水文环境要素分析方法[M].北京:科学出版社,2010. ZUO J C, DU L, CHEN M X, et al. Analysis method of marine hydrological environment elements[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 吴伦宇, 王兴, 熊学军. 渤海海峡潮流能高分辨率数值估算[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 12-21. WULY, WANGX, XIONGXJ. Assessment of tidal stream energy in the Bohai Strait using a high resolution model[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 12-21.
- [3] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009. WANG C K, LU W. Ocean energy resource analysis method and reserve evaluation[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
- [4] 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(1): 15-20. CHEN G X. The reserve, distribution, exploitation and utilization of the tidal current energy along Zhejiang Nearshore Changjiang Estuary[J]. East China Sea, 1991(1): 15-20.
- [5] 赵建春,陆延,陈国海,等.灌门水道潮流能资源评估及开发条件初步分析[J]. 海洋技术学报,2017,36(4):64-69. ZHAO J C, LU Y, CHEN G H, et al. Preliminary analysis on the tidal current energy resources in the Guanmen channel off the coast off Zhejiang Province, China[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(4): 64-69.
- [6] 何世钧. 舟山地区潮流特性和能量参数[J]. 能源工程, 1982(4): 1-5. HE S J. Tidal current characteristics and energy parameters in Zhoushan area[J]. Energy Engineering, 1982(4): 1-5.
- [7] 王智峰,周良明,张弓贲,等. 舟山海域特定水道潮流能估算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(8): 27-33. WANG Z F, ZHOU L M, ZHANG G B, et al. Tidal stream energy assessment in specific channels of Zhoushan sea area[J]. Periodocal of Ocean University of China, 2010, 40(8): 27-33.

- [8] 侯放,于华明,鲍献文,等. 舟山群岛海域潮流能数值估算与分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 125-133. HOU F, YU H M, BAO X W, et al. Analysis of tidal current energy in Zhoushan sea area based on high resolution numerical modeling[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(1): 125-133.
- [9] 王卫远,杨娟. 舟山海域潮流能资源评估[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(3): 54-60. WANG W Y, YANG J. Assessment of tidal current energy resources in Zhoushan sea area[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(3): 53-60.
- [10] 陆延,赵建春,蔡丽,等. 潮流能并网发电示范项目选址研究——以舟山兆瓦级潮流能示范项目为例[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(4): 77-85. LU Y, ZHAO J C, CAI L, et al. Study on site selection of demonstration project of tidal current energy grid-connected power generation: taking Zhoushan megawatt tidal current energy demonstration project as an example[J]. Ocean Technology, 2020, 39(4): 77-85.
- [11] 林东,姜芳,陈海波.海洋潮流能示范应用与展望[J].中国电业,2021(1):48-49. LIN D, JIANG F, CHEN H B. Demonstration application and prospect of ocean tidal energy[J]. China Electric Power, 2021(1):48-49.
- [12] 李允武. 海洋能源开发[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. LIYW. Marine energy development [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [13] 韩家新.中国近海海洋——海洋可再生能源[M].北京:海洋出版社,2010. HAN J X. China offshore ocean: marine renewable energy
 [M]. Beijing: Ocean Press, 2010.
- [14] 宋德海,鲍献文,朱学明. 基于 FVCOM 的钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009(2): 9-16. SONG D H, BAO X W, ZHU X M. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in Qinzhou bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009(2): 9-16.
- [15] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [16] EGBERTG D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [17] 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. WUYN,WUH,FENGZ. Assessment of tidal current energy resource at Putuo mountain-Hulu island waterway[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10): 1566-1573.
- [18] 李庆杰,周良明,吴克俭,等.成山头海域潮流能的估算[J].海洋湖沼通报,2013(3):10-18. LIQJ, ZHOULM, WUKJ, et al. Tidal stream energy assessment on Chengshantou[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(3):10-18.
- [19] HAGERMAN G, POLAGYE B. Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by Tidal in-Stream Energy Conversion (TISEC) devices [EB/OL]. (2006-06-14) [2022-02-16]. https://www.researchgate.net/publication/313715704_ Methodology_for_estimating_tidal_current_energy_resources_and_power_production_by_tidal_in-stream_energy_conversion_TISEC _devices.
- [20] BRYDEN I G, GRINSTED T, MELVILLE G T. Assessing the potential of 3a simple channel to deliver useful energy[J]. Applied Ocean Research, 2004, 26(5): 198-204.
- [21] 舟山市统计局,国家统计局舟山调查队. 2020年舟山市国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2021-04-21) [2021-09-03]. http:// zstj.zhoushan.gov.cn/art/2021/4/2/art_1229339440_3655927.html.2021-04-21. Zhoushan Municipal Statistics Bureau, National Municipal Statistics Bureau Zhoushan Investigation Team. Statistical communique of the Zhoushan's national economic and social development in 2020[EB/OL]. (2021-04-21)[2021-09-03]. http://zstj.zhoushan.gov.cn/art/2021/4/2/art_1229339440_3655927.html.2021-04-21.

Tidal Current Energy Resources Evaluation and Site Choosing of Power Plant in the Xihoumen Channel of Zhoushan

ZHANG Jie¹, JI Qi-yan¹, ZUO Jun-cheng², PENG Teng-teng¹, SU Yu¹, SUN Yong-zhao¹

(1. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A high-resolution tidal model for coastal sea adjacent to Zhoushan was established based on the unstructured grid, Finite-Volume, primitive equation Community Ocean Model (FVCOM). The model simulation results were in good agreement with observational data, suggesting that the model can well reveal the tidal characteristics in the sea area. Tidal current energy in the Xihoumen Channel of Zhoushan was estimated based on model simulation results, the optimal location for power station was determined and the annual mean effective tidal energy at the location was also analyzed. The results show that the tidal current in the channel is dominated by alternating tidal current and the annual mean velocity and annual maximum velocity are greater than 1.2 m/s and 2.6 m/s, respectively. The annual mean and annual maximum energy flow density are greater than 1.2 kW/m^2 and 6.5 kW/m^2 , respectively. The spatial distribution of the current velocity and the energy flow density in the channel are similar, both has three peak areas with values increase from the northwest to the southeast. The seasonal distribution of the current velocity and the energy flow density in the channel exhibits similar. The velocity and the energy flow density reach their maximum value in January, and are moderate in April (spring) and October (autumn), smallest in July (summer). Considering the tidal current energy resources and the criteria for selecting the power station site, the northwest cape of Cezi Island is then selected as the optimal power station site in the Xihoumen Chanel. The total average power and effective power at the selected site are 30.0 MW and 4.5 MW, respectively. Compared with existing power stations, the power generation capacity at the selected site is much larger and has great development potential.

Key words: Xihoumen Channel; tidal current energy; FVCOM(Finite-Volume, primitive equation Community Ocean Model); Flux method

Received: April 4, 2021