

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.004

潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述

张继生^{1,2},汪国辉²,林祥峰²

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 针对潮流能这一海洋可再生能源的热点问题,总结了潮流能资源的分布现状,梳理潮流能发电装置的分类,介绍了当前国内外主要的潮流能示范工程。从潮流能资源评估、潮流能装置的安全稳定、转换效率与多能互补、尾流效应、潮流能阵列发展及带来的环境问题等几个方面探讨潮流能发展中的关键科技问题,指出发展潮流能的可行性和必要性以及当前面临的问题和挑战。

关键词: 潮流能;示范工程;稳定性;阵列布局;环境效应;综述

中图分类号:P743.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2021)03-0220-13

A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy

ZHANG Jisheng^{1,2}, WANG Guohui², LIN Xiangfeng²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The utilization of tidal stream energy has become one of the hot research topics in the field of ocean renewable energy. In this study, the distribution status of tidal stream energy resource and classification of tidal stream energy converter (TSEC) were summarized, and the current main demonstration projects of tidal stream energy at home and abroad were introduced. The key technologies of TSEC including the assessment of tidal energy resources, the safety and stability of TSEC, the utilization efficiency and multi-complementary of ocean renewable energy, the wake effect, and the environmental impacts of TSEC array have been discussed. Although the development of TSEC is feasible and necessary, there are still many challenges and difficulties to be solved.

Key words: tidal stream energy; demonstration project; stability; array deployment; environmental impact; comprehensive review

世界气象组织发布的 2019 年《温室气体公报》中指出,大气中二氧化碳浓度达到 4.078×10^{-4} mg/L,再次刷新了纪录,为 1750 年工业化前水平的 147%。如何减少全球的碳排放量和控制全球变暖所带来的一系列气候环境问题已经成为全人类面临的重大挑战。作为经济大国,高速发展带来的巨大能源消耗也使得我国的碳排放形势相当的严峻。合理地改善能源结构,加大清洁能源在能源消费中的占比迫在眉睫。

蕴藏量极其丰富的海洋可再生能源已然对于改善能源结构、控制气候变暖和解决环境污染问题具有重要意义。潮流能作为海洋可再生能源中的重要组成部分,相比其他海洋能而言,其具有较强的规律性和可预测性^[1],且潮流能开发利用装置一般安装在海底或漂浮在海面,无须建造大型水坝,对海洋环境影响小,也不占用宝贵的土地资源。与风能和太阳能相比,潮流能的能量密度高,约为风能的 4 倍、太阳能的 30 倍^[2]。为提高海洋能开发利用能力,推进海洋能技术产业化,拓展蓝色经济空间,在“十三五”期间(2016—2020 年)出台的海洋经济发展规划^[3]中,更是把绿色发展作为海洋经济发展的基本原则之一,这些都为我国开发利用潮流能提供了有利条件。

古往今来,对于潮汐潮流现象的观察、记录一直都存在,直到 20 世纪 70 年代,人们才开始逐步探究潮流能的开发利用问题,随后美国、英国等国家对潮流能发电技术进行了不断的完善和发展。我国也在同时期逐

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51879098);海洋可再生能源专项(GHME2017YY01)
作者简介: 张继生(1979—),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源工程研究。E-mail: jszhang@ hhu. edu. cn
引用本文: 张继生,汪国辉,林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):220-232.
ZHANG Jisheng, WANG Guohui, LIN Xiangfeng. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 220-232.

步开展潮流能的相关研究,并取得了显著进展。本文将从潮流能资源分布现状、潮流能发电装置和示范工程以及关键科技问题等方面对潮流能发展作一个综述。

1 潮流能资源分布现状

潮流能是指月球和太阳的引潮力使海水产生周期性的往复水平运动而形成的动能,发电原理是将水流中的动能通过装置转化为机械能,进而将机械能转化为电能^[4]。适宜开发潮流能的区域通常是指流速峰值大于 2 m/s 的位置,发电装置通常在潮流流速为 0.8 m/s 时启动。开阔海域的潮流速度通常仅为 0.1 m/s,但潮波与邻近陆块之间的岬角、岛屿和狭窄海峡等海岸地形的相互作用可使得流速超过 2 m/s。因此,合适的地点位于沿海水域且高度局部化^[5]。根据亚特兰蒂斯能源公司的报告,潮流能在全 球范围内储量超过 120 GW^[6]。对于潮流能资源的评估,国内外学者提出了许多不同的评估方法,在国际上大致可分为 2 种^[7]:一是基于动能通量的方法,其中以 Farm 方法^[8]与 Flux 方法^[9]为典型;二是基于动力分析的方法,具有代表性的是 Garrett 方法^[10]以及 Vennell 方法^[11]。基于动能通量的方法因其计算思路清晰,容易理解,在实际应用较为广泛,但是存在着较大的不确定性。而后者对潮流能开发的条件引入了多种假设,尽管基于众多假定,该方法仍不失其物理意义,但其可靠性还需要更多实践的检验。

评估可用的潮流能资源是工程选址和装置部署的关键第一步。然而,选址并不是简单地确定潮流流速大的区域,还要考虑资源的时间和空间变异性,根据欧洲海洋能源中心(EMEC)的潮能资源评估指南^[12],根据评估的范围和精细程度,潮流能资源评估可分为 4 个阶段。第一阶段是“区域评估”,即在区域或国家层面进行评估,目的是通过数值模拟了解潮流能资源的规模和特点。第二阶段是“预可行性研究”,详细探讨之前在区域范围内确定的具体资源位置。在这一阶段,基本采用现场调查和数值模拟相结合的方法。对于这 2 个阶段,建议至少模拟 2~4 个分潮 30 d 的时间。第 3 和第 4 阶段分别是“完全可行性研究”和“设计开发”阶段,包括详细的经济模型和最终设计开发。较早的潮流能资源评估出现在欧洲,英国、法国、西班牙、爱尔兰、挪威等国海域都有着丰富的潮流能资源,相关政府也出台了一系列潮流能政策促进资源开发,其中英国拥有绝佳的潮流环境与先进的技术支持,其潮流能发展走在世界前列。在资源开发方面,根据欧洲海洋能组织(OEE)的统计,截至 2019 年底,欧洲潮流能总装机容量达 27.7 MW,大约为世界其他地区的 4 倍。

英国碳信托基金(CT)委托开展了多项海洋能资源评估研究^[13],据估计,仅潮流能一项就可在英国 1 450 km² 的水域范围内每年提取 18TW·h,这将满足英国现有电力需求的 5%。Blunden 等^[14]总结指出由能源技术支持单位(ETSU)的调查结果表明,英国年潮流能开发总量大约为 57 639 GW·h。欧盟委员会(EC)对英国的潮流能调查表明英国总潮流能为 8 900 MW,年输出总潮流能约为 30 910 GW·h。以位于英格兰大陆北部与 Orkney 群岛之间的 Pentland 湾为例,该海域潮流能资源丰富,有着流速峰值接近 5 m/s 的潮流,且基本不受波浪的影响,可以说是世界上最有前景的潮流资源开发区域。Murray 等^[15]评估了英国 Pentland 湾可利用的潮流能资源,研究发现在一个 M2 分潮周期内潮流能的可提取最大值达 10.8 GW,平均值可达 4.9 GW。Draper 等^[16]模拟预测了整个海湾可提取约 4.2 GW 的功率,Defne 等^[17]考虑了潮流能水轮机从 Pentland 湾提取的功率上限,评估了该地区实际可利用潮流能资源,估计最大可用功率约 1.9 GW,当前该区域已有多个潮流能示范工程项目。近些年来,英国潮流能发展迅速,先后出台了《海洋能源行动计划》《英国海洋能技术路线图(2014)》等政策。2020 年以后,将会大规模部署潮流能水轮机阵列装置,这将有助于政府实现到 2050 年减少 80% 碳排放的政策目标。

法国的潮流能资源主要分布于临大西洋一侧,Campbell 等^[18]通过区域应用模型在法国临大西洋侧的海域中选出了 20 处适合潮流能开发的海域。当仅考虑开发潮流平均流速大于 1.5 m/s 的海域时,使用高、低效率的潮流能水轮机阵列,潮流能总可开发量分别为 9.71 GW、1.46 GW;当考虑开发潮流平均流速大于 0.5 m/s 的海域时,使用高、低效率的潮流能水轮机阵列,潮流能总可开发量分别为 16.58 GW 和 2.49 GW。法国政府同样支持海洋可再生能源领域的研究,除了资助法国国家海洋能研究所发起建立的联盟研发计划以及地方项目,为了促进法国潮流能与海上风电等新能源产业发展,地方政府在临海多地投资港口设施建设,从而为在新码头区建设发电厂提供了足够的空间。

根据欧盟委员会的非核能项目估计,欧洲总体可利用的潮流能资源高达 12.5 GW^[19]。当前,欧洲多国政府达成共识,组建了多个潮流能试验场用以支持欧洲海域潮流能开发工作,其中包括英国的 ECMC 欧洲

海洋能中心、爱尔兰的 Galway 试验基地以及丹麦的 Nissum Breeding 测试中心等。

除了欧洲地区,北美各国也开展了潮流能资源的评估,美国电力研究协会完成了北美沿岸潮流能资源评估研究报告^[20],该评估采用 Flux 方法,结果表明美国阿拉斯加的 Cornik 湾、华盛顿的 Tacoma 海峡、加利福尼亚的 Golden Gate 水道以及加拿大 Minas 水道都是潮流能资源丰富的区域,是较为理想的开发选址。Hagerman 等^[21]对美国的潮流能资源进行了区域评价,划出了最大平均动能密度超过 500 W/m^2 的区域。美国历来将能源安全作为其重要的国家战略,美国可再生能源联盟于 2010 年发布了《国家海洋和水动力可再生能源技术路线图》,提出至 2025 年海洋可再生能源装机容量达到 100 MW,当前,美国在海洋和水力可再生能源方面支持项目超过了 70 个。

加拿大国家研究委员会水利中心基于潮汐潮流数据库的实测资料并借助 Tide2D 潮流模型的模拟结果,通过 Flux 方法计算了潮流能平均能流密度和潮流能理论年平均功率,评估结果表明加拿大沿岸约有 190 个潮流能理论平均功率在 1 MW 以上的水道,潮流能理论年平均功率的总和超 42 GW,其中潮流能资源储量最丰富的海域位于 Mill 岛和 Salibury 岛之间,理论平均功率可达 $10.42 \text{ GW}^{[22]}$ 。加拿大政府设立了海洋可再生能源装机容量于 2020 年达到 250 MW、2030 年将达到 2 GW 的目标^[23],并建立了一个世界领先、并网、共享的潮流能示范中心——芬迪海洋能源研究中心。

在亚洲地区, Kim 等^[24]对韩国西南海岸进行了大量的潮流观测,发现 Uldolmok 海峡具有最大的潮流流速,最大可达 6.5 m/s ;韩国海洋研究发展院对 Changjuk 和 Hoenggan 海峡的潮流进行了观测和研究,利用平面二维潮流数值模型模拟了韩国西南沿海潮流特性,得到潮流能理论储量约 5 900 MW,经济可利用储量为 470 MW。

我国海域辽阔,各海域潮流能资源分布情况存在较大差异^[25]。我国沿岸潮流能平均功率密度分布情况如下:东海沿岸是以半日潮为主的海岸线,浙江沿岸与舟山群岛之间水道众多,极大增强了潮流流速,水下多为基岩且水深足够,尤其以龟山航门、西堠门水道、杭州湾北部等处,属于潮流能资源丰富区,实测最大流速可达 3.4 m/s ,被认为是我国潮流能开发利用的理想场所。侯放等^[26]对比分析了舟山群岛最大潮流流速超过 2.5 m/s 的 8 处水道的潮流能分布状况,结果表明该海域重要水道的潮流能理论蕴藏总量约 1 400 MW,其中在资源丰富的重要水道的技术可开发总量约 200 MW。其次,福建沿岸也有着较为丰富的潮流能资源。例如,金永德等^[27]对福建莆田南日岛附近海域进行了潮流能估算,得到该海域大潮期间可开发潮流能功率在 $0.5 \sim 1.0 \text{ MW}$ 之间,小潮期间可开发潮流能功率在 $0.2 \sim 0.4 \text{ MW}$ 之间。福建还有三沙湾口、罗源湾口等处流速较大,海况平稳,具有较为优越的开发环境。渤海海峡位于辽东半岛和山东半岛之间,其中潮流以规则半日潮和不规则半日潮为主,大部分海域的流速约 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。但在老铁山角附近海域存在超过 2 m/s 的大片海区,武贺等^[28]指出老铁山北侧近岸海域最大可能流速约 2.5 m/s ,平均能流密度超过 500 W/m^2 ,具有可开发的價值。另外,吴伦宇等^[29]计算模拟得出老铁山有的区域超过了 3 m/s ,最大值为 3.3 m/s ,这也是渤海海峡模拟的最大流速,潮流能流密度超过 100 W/m^2 的区域就高达 515 km^2 。与此同时,位于山东沿岸的北隍城北侧与成山头外的两处海域最大流速超过了 2 m/s ,能流密度超过 4 kW/m^2 。杨利利^[30]采用 Flux 方法估算得到成山头外海域潮流能的总蕴藏量为 122.85 MW,可开发量为 18.43 MW,并且海域潮差小、离岸较近,适宜开发。南海大部分海域潮流流速小于 0.5 m/s ,只有琼州海峡和珠江口等少数地区潮流流速大于 1 m/s ,能开发的区域主要位于琼州海峡,琼州海峡内大部分海域最大可能流速都超过 2.4 m/s ,表层大潮年平均功率密度大于 1500 W/m^2 ,开发区离岸 10 km 以内海域作为优先开发利用区域,该区域面积可达 192 W/m^2 ,具有广阔的开发前景^[31]。

在 1986 年,国家海洋局部署开展了对海洋能源储量的调查,在《中国沿海农村海洋能资源区划》中统计了我国 130 个水道潮流能的资源^[32],我国沿岸潮流能理论平均功率为 13 950 MW,其中大部分都在东海沿岸,占可利用潮流能总量的 78.6%。其中浙江沿岸 37 个水道,理论平均功率为 7 090 MW,占全国总量的一半以上,其次为福建、山东、辽宁、海南等地。在 2004 年,国家海洋局开展了我国近海海洋综合调查与评价专项(简称 908 专项),进一步摸清了我国近海 99 条主要水道中潮流能蕴藏量为 8 330 MW,技术可开发量为 1 660 MW^[33-34]。我国的潮流能主要分布在东海沿岸,如舟山群岛有着众多的水道,且其流速、地形条件较为优越,能供潮流能站址选择余地大,当前已有不少研究机构和企业在此建设了多个潮流能示范工程项目。在政策方面,我国于 2012 年首次将海洋能纳入“五年规划”,将发展海洋能产业提升到国家战略层面,充分展现

了我国发展可再生能源的强烈愿景。在装机容量方面,截至 2019 年 6 月底,我国潮流能电站总装机容量达 2.8 MW,累计发电 350 万 kW · h^[35]。

2 潮流能发电技术与示范工程

自潮流能发电的概念逐步受到关注以来,发电技术便得到不断的发展和完善,国内外针对潮流能发电技术做了很多研究工作,也陆续建设了一些示范工程。

2.1 潮流能发电装置

潮流能发电装置在开发过程中,逐渐研发出多种不同的结构形式,其中根据来流的流向与水轮机装置转动轴的位置关系,可分为水平轴式水轮机和垂直轴式水轮机,还有通过支撑臂摆动来获能的振荡水翼技术等^[36];现有的多数潮流能装置采用直接固定于海底的方法,这样更有利于获能的稳定,但如果需要在离岸较远、水位较深的地方安装装置,则需采用漂浮式结构以便于安装和节约成本。利用天然潮流所带来的动能推动装置发电的技术可以避免如潮汐发电站或水电站需要修建堤坝与配套设施,能减少相应的投资,且水轮机装置对生态环境影响小。然而,水轮机旋转面的面积只占据了潮流截面的一小部分,对潮流能的利用率较低,同时要求潮流流速达到一定的条件来保证发电量。当前,国际上潮流能发电技术以欧洲国家较为成熟,在潮流能资源丰富的地区,进行了多种类型的全比例水轮机样机真实海况测试。2020 年,苏格兰 Texo 公司计划在 EMEC 试验场安装 2 MW 的 SR2000 机组,潮流能行业已然进入试商业化运行阶段。

2.1.1 水平轴式水轮机

当水流方向与水轮机叶轮旋转轴平行,为水平轴式水轮机。该类型水轮机的叶片均布于轮毂上,现主要以三叶片叶轮为主,通过水流作用在叶片上产生的升力和转矩推动叶轮绕着横轴旋转,以此将水流动能转化为旋转的机械能,然后旋转的主轴将驱动发电机发电,将机械能转化为电能^[37]。水平轴式水轮机的发电技术与风轮机发电技术有很大相似性,很多技术沿用了风轮机技术,有较好的前期基础,目前水平轴式水轮机主要包括英国 MCT 公司研发的 SeaGen 系列,英国 SMD 公司的 TidEL 项目以及爱尔兰 OpenHydeo 公司的 Open Ventre 装置等。与垂直轴式水轮机相比,水平轴式水轮机结构简单,稳定性好。同时,水平轴叶轮具有更佳的效率转换、自启动力矩大、转动稳定等优点;但其叶片结构较垂直轴式更为复杂,且简单高效叶片以及如何避免空化有待深入研究,需换向或变桨机构以适应潮流的双向特性,结构整体比较复杂^[38]。据 Corsatea 等^[39]调查显示,潮流能行业 76% 的投资都用于研发水平轴式潮流能水轮机。

2.1.2 垂直轴式水轮机

垂直轴式水轮机发电原理与水平轴式类似,但其水流方向与水轮机叶轮旋转轴垂直。该类型水轮机的叶轮旋转面平行于水流,叶片均布于轮缘上,叶片在水流作用下产生的升力、阻力及其转矩推动叶轮绕主轴旋转,主轴带动发电机运转,从而达到发电状态^[40]。目前垂直轴式水轮机主要包括加拿大 NE 公司设计的 EnCurrent 垂直轴式潮流发电系统、美国 ORP 公司通过螺旋叶片方案设计的 CGen 潮流能发电装置以及哈尔滨工程大学设计的万向系列水轮机等。与水平轴式叶轮相比,垂直轴式叶轮主要优点^[41]是:有着更为简单的设计,较大降低了装置总成本,可以利用来自任何方向的水流,并不需要用到任何偏航设备;适合大规模阵列布置;叶片采用对称翼型结构简单便于制造;发电机可置于叶轮主轴的上端水面之上以降低水下密封的难度和成本;也有研究表明它能更好地适应湍流环境^[42]。此外,工作转速较低,不易空化、减少叶尖损失,更有效地降低噪音,这样有利于保护海洋生物的栖息地^[43]。缺点主要是:相对于水平轴式较低的自启动能力、较高的扭矩波动以及通常低于水平轴式水轮机的获能效率,且其叶片攻角在一个旋转周期内处于变化的状态,会导致输出功率的不平衡。同时,这也会令其在紧急情况下很难停止,因为它不容易在水流中旋出,而水平轴式可以通过变桨将叶片与水流方向平行以达到停止,它需要比水平轴式叶片具有更光洁的表面,以保持较高的升阻比,这是达到合理效率所必需的,但这在海水中很难得到有效保持,也会导致其制造和维护成本显著增加。

2.1.3 振荡水翼技术

该类型机组主要由振荡悬臂、水翼及液压发电单元组成,振荡悬臂在水翼两侧潮流的推动下摆动,其摆动可驱动高压液体从而带动液压发电机发电,从而将动能转换为电能^[44]。区别于传统水轮机旋转获能发电,振荡水翼技术克服传统水轮机占用水深大和环境影响强的缺点。水翼转轴竖向安装,可以避免因水翼与

水密度不同而引起的水翼上浮或下沉,优化了其运动效果。水翼结构形式十分简单,相对于其他获能结构制造简便,不易损坏,即便破坏也易于更换,具有更好的工程利用价值^[45]。振荡水翼的悬臂扫掠的区域宽而浅,所以在浅海中有着一一定的优势,但相对于研究相对成熟的水平轴式和竖直轴式潮流发电技术而言,振荡水翼技术在水域中进行的是非定常运动,所带来的更为复杂的尾部湍流与大尺度涡旋难以模拟,使得该技术存在极大的不稳定性,这意味着设计必须采用保守的安全裕度,产生更高的成本,同时控制策略也不是最优的,也会导致能源利用率的降低^[46]。因此,目前振荡水翼运行项目相对较少,主要有英国 EBL 公司设计的 150 kW 振荡式潮流能装置 Stingray 和 PT 公司开发的 100 kW“Pulse-Stream 100”样机等。

2.2 支撑结构

水轮机装置在运行过程中,除了多变的海洋环境会影响其工作状态,也会受到水轮机装置支撑结构的影响。水轮机生命周期在很大程度上取决于结构与水动力相互作用,如 Mason-Jones 等^[47]分别对多种不同形状的支撑桩柱以及在有、无支撑结构时对水平轴式水轮机性能的影响进行了对比研究,结果发现不同的支撑结构会使扭矩、功率和轴向推力的振幅变化皆有不同,且支撑结构的存在会使扭矩、功率和轴向推力的振幅增大。因此,在几何设计和材料选择阶段,准确量化荷载(包括所选用的支撑结构上的阻力)是相当重要的。当前,水轮机支撑结构安装形式主要有重力式、桩柱式和漂浮式。

重力式结构可以理解采用重力基脚和沉箱等结构,主要依靠基础及压载物重量抵抗上部水流通过水轮机时所引起的倾覆力矩和滑动力,从而使装置结构在海底保持稳定的安装形式。该基础形式结构简单,应用技术成熟,适合水轮机的长期作业。然而重力式基础适用于坚硬的黏土、砂土以及岩石地基,地基须有足够的承载力支撑基础结构自重。桩柱式是将桩基固埋设于海底的安装形式。此种安装结构能够抵御波浪等恶劣环境的冲击,有着较高的安全可靠系数,当前多数潮流能示范工程采用桩柱式基础。但在施工过程中需要进行水下作业,且安装后的桩柱难以回收,成本较高。随着水深的不断增加,固定式基础的成本变高并且安装运输不便,漂浮式基础能很好地克服这一问题,漂浮式基础包括了单柱式平台、半潜式等,依靠系泊系统固结于海底,其优点在于节约成本、安装便捷、易于维修与拆除。漂浮式载体浮于自由液面上,易受风浪的影响使得载体摇摆,导致水下发发电装置的获能不稳定;占据一定的水面空间,不利于水上交通运输。

2.3 潮流能示范工程

随着潮流能发电技术的不断发展和完善,世界各国陆续涌现了一些潮流能示范工程和拟建项目,其中欧洲国家起到了主导作用。英国从 20 世纪 70 年代以来,制定了强调能源多元化的政策,鼓励发展包括海洋能在内的多种可再生能源^[48]。在 2003 年,MCT 在英国 Bristol 海峡试验了一种额定功率 300 kW 的新型潮流能水轮机 SeaFlow,在有利海况下,转子转速能达到 15 r/min,该水轮机固定在可升降的支柱上,作为没有并网的试验平台。在 2008 年,MCT 公司又设计建造了其第二代产品 SeaGen 潮流能水轮机,并首次采用了双叶轮结构,单转子的额定功率可达 500 kW,总额定功率 1 MW,该机组于 2019 年拆除,是首个完全退役的商业化规模潮流能水轮机^[49]。在 2010 年,SAE 开启了 MeyGen 示范项目,是目前世界上最大的规划潮流能项目,该项目由 4 台 1.5 MW 的 AR1500 机组组成。英国 Orbital 公司研发的 O2 机组于 2017 年 10 月至 2018 年 10 月,在 EMEC 示范运行 1 a,总发电量达到了 3.2 GW·h。

2010 年以来,欧洲出台了多个旨在促进海洋可再生能源研究和开发的计划,充分反映出欧洲整体对海洋可再生能源的重视,其中欧盟的“Horizon 2020”快速通道创新试点计划赞助了包括西班牙 MR 公司研发测试的 2 MW 潮流能机组 ATIR、苏格兰 NI 公司研发的致力于节约潮流能发电成本的 PTO 项目等。通过政策与资金的支持,截至 2019 年底,欧洲潮流能总装机容量达到了 27.7 MW。潮流能发电能力得到大幅提升,发电量增加了 15 GW·h,总发电量达 49 GW·h^[50]。

我国近代潮流能研究始于 20 世纪 70 年代末,1979 年舟山的渔民何世均父子制作船用螺旋桨式叶轮及液压传动潮流能发电样机,悬挂于渔船尾部,在舟山群岛西候门水道进行试验,并成功发电。随着国家对可再生能源的重视,参与单位逐渐增加;2010 年后,进入了快速发展时期^[51]。在水轮机海试项目上也频传捷报,其中包括了哈尔滨工程大学研发的“万向”“海能”“海明”等垂直轴式和水平轴式水轮机;中国海洋大学研发的 5 kW 垂直轴式柔性叶片水轮机,50 kW 的坐底式水平轴式水轮机和用于海岛独立供电的 100 kW 水平轴式潮流能发电装置;东北师范大学研制的 300 kW 自变距三叶片机组;浙江大学在摘箬山岛海域建成了多个漂浮式测试平台,2014 年起,开展了多个示范项目,包括了 60 kW 和 120 kW 三叶片机组。在前期基础

上,浙江大学于 2017 年下半年在搁箬山岛海域内测试大长径比半直驱高效水平轴 650 kW 海流能发电机组,完成研制并成功并网发电,是目前国内单机发电功率最大的潮流能发电装置。在 2018 年,浙江大学与国电联合动力公司联合承担的“2×300 kW 潮流能发电工程样机产品化设计与制作”项目成功下海并发电,首次实现了 270°变桨技术,整机转换效率接近 40%。除了高等学校和科研院所,不少企业也加入了潮流能水轮机的研发队伍,其中包括了浙江舟山联合动能新能源开发有限公司研发的 LHD 海洋潮流能发电项目。2016 年,该项目首期安装总功率为 1 MW 的机组下海发电,2018 年 11 月与 12 月,LHD 新型发电机组 G 模块与 LHD 第三代水平轴式模块化发电机组相继投入运行,LHD 海洋潮流能发电项目投运总装机达到 1.7 MW,截至 2019 年 8 月 26 日,其中 1 MW 机组连续发电并网运行 27 个月。2019 年 7 月,哈尔滨电气集团有限公司的 600 kW 坐底式潮流发电机被顺利验收,成为我国拥有完全自主知识产权的最大功率潮流能发电机组。2020 年 6 月 29 日,国内首个具备公共测试和示范功能的潮流能试验平台——舟山潮流能示范工程的 450 kW 水平轴式水轮机正式实现了双向并网互通。

潮流能工程在我国发展迅速,多个大型项目下海且并网,对我国海洋可再生能源技术的探索起着积极的作用,如 2015 年国家海洋可再生能源专项资金项目“舟山潮流能示范工程”。该平台建成后,将会为全国潮流能源企业与科研院所提供研究平台,对我国发展规模化潮流能发电场提供数据支撑和技术支持。机组在设计阶段,为了有效防止机组叶片产生空化现象并保证正常运行,根据选定的水轮机尺寸及其与海面、海底的上、下间隙要求,给出轮毂高度位置。同时,为避免水体湍流影响,机组还应尽量避开海底地形起伏较大的区域。工程区域海床底质类型主要以粉砂为主,局部分布有砂质粉砂,由于湍急流速会带来支撑结构及部件与泥沙接触磨损,控制水轮机转速从而减轻过流部件泥沙磨损,以及采用性能优异、抗腐蚀性能好、机械强度高的玻璃纤维材料使机组有着良好的使用寿命。其次,浙江沿岸受到台风影响严重,机组设计时考虑了 50 年一遇的最大风速,并选用目前研究最多、应用最广、相对可靠的桩柱式支撑结构,采用垂直升降装置,在必要时可通过该升降装置将机组升至检修平台,确保结构安全稳定。在场区建立了海洋环境监测系统,对整个测试区的水文、气象等海洋环境要素进行长期监测,从而对潮流能发电装置布放后对海洋环境的影响进行分析和评价。

3 关键技术问题

3.1 潮流能资源评估技术

潮流能资源评估工作一般可分为 3 个阶段:资源普查阶段、区域性资源详查阶段和工程建设的评估阶段^[52]。其中,资源普查阶段旨在评估自然状态下潮流能蕴藏量。在进行潮流能资源评估时,主要是采用计算单位时间通过单位面积的潮流动能评估海域的蕴藏量。例如,在 1986 年的沿海农村海洋能资源区划和 2004 年的 908 专项潮流能资源调查中,都是采用这种方法^[53]。在现实工程中,受限于技术水平与当地资源环境要求等因素,并不能完全将海水的动能转化为电能。所以第二阶段为区域性详查阶段是在具备了可行技术条件下或控制恰当的环境影响下对某个的具体水道的可进行开发的最多的潮流能资源进行评估。当前采用的是基于能通量的方法和基于动力分析的方法进行潮流能资源的评估。其中,应用比较广泛的是基于能通量的方法,包括 Farm 方法和 Flux 方法。基于动力分析的方法是 Garrett 方法以及 Vennell 方法。例如,吴亚楠等^[54]运用 Flux 法和 Garrett 法对普陀山—葫芦岛水道的潮流能资源可开发量进行了评估及对比分析,结果表明利用 Flux 方法得到的可开发量为 1.98 ~ 3.23 MW,利用 Garrett 方法得到的可开发量为 5.33 ~ 6.08 MW,两者相差较大,但判断哪种方法的评估结果更为准确还有待研究。关于加拿大 Fundy 湾 Minas 水道的潮流能资源可开发量的估计,也存在类似情形^[55]。此外,海底地形条件和环境流速条件、水轮机安装成本、规模化与并入电网、环境效应等因素也会约束实际开发的潮流能资源量^[56]。因此,第三阶段则是从经济学、合法性、生态环保性等多方面的背景下,估算特定区域和特定水轮机布局下的潮流能资源的开发量。在潮流能工程的不同阶段,资源评估技术的选择及结果是否准确直接影响到工程决策和开发利用效益。

3.2 获能效率与多能互补

水轮机是将流体的动能转化成机械能的装置,需要通过计算能量转换效率来评估其性能,提升水轮机的获能效率是当下潮流能技术研究重点。水轮机获能特性会受到来流速度、水轮机尺寸、转速等因素的影响,而这些因素可转化为有利于比较和规范化的叶尖速比参数^[57]。获能效率与叶尖速比呈非线性关系,随着叶

尖速比的增加,获能效率逐步增加,当达到最佳叶尖速比时,获能效率达到峰值,随后开始逐渐下降,水轮机的最佳叶尖速比随着叶片翼型不同会略有区别。考虑到贝茨极限,在最理想情况下,水轮机能提取 59.3% 的输入动能,并将其转化为有效功^[58]。然而,在工程实践中,由于来流不稳定、叶片与支撑结构相互作用及水轮机系统阻力消耗的影响,实际获能效率远小于该理想数。例如,Jo 等^[59]模拟了基于叶素理论设计的 NACA-S812 翼型,结果显示当叶尖速比为 5 时,最大获能效率为 40%。Seo 等^[60]测量了直径为 0.4 m 的水平轴式潮流能水轮机模型的近尾流场和动力性能,研究发现在低叶尖速比下,水轮机轮毂和叶根附近的流动分离增加了二次流,会导致额外的能量损失。康海贵等^[61]提出了一种新型六叶片水轮机,研究了该水轮机与普通三叶片水轮机的自启动性能和能量捕获性能,结果表明该水轮机总体优于普通三叶片水轮机。

潮流能发电装置放置于水下,水面部分可结合近岸风电或波能装置形成多能互补发电系统,可再生能源多能互补发电相比单一的风能或水能更高效^[62]。国内外学者在这一领域有着不断地创新,例如高杰^[63]设计了一套潮流能-风能互补发电装置并研究了该装置的运动响应,该模型从上到下组成部件依次为风力发电机叶轮、浮体基础和水轮机,其中三叶轮风力发电机安装在浮体基础的最顶端,三叶轮水轮机则悬挂安装在浮体基础下方。研究结果表明,所设计的潮流能-风能互补发电装置在风浪较大的海况下,水轮机叶片上的受力不均匀会干扰水轮机的正常工作。但是,该装置的优点在于充分利用海域,在比较平稳的海况下可满足正常发电要求。施伟等^[64]设计了一种基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统,可充分利用海上可再生能源,从而达到提高单桩基础利用率并降低集成系统发电总成本的目的,提高了海域的有效利用率。美国 GHT 公司^[65]在缅因州科斯克湾建立了潮流能-波浪能联合发电站,海试结果表明该电站运行比较平稳,可以很好地适应多种海况。通过多能互补的方式可以充分利用海域,方便输电管道的铺设,相较于单一的发电系统,也可进一步的降低成本,深入开展该方向研究将有利于更好地推进潮流能等海洋新能源的发展进程。

3.3 安全可靠

综合潮流能发电装置的长远发展来看,机组的安全可靠是关键前提。水轮机尽管与风力发电机类似,但由于水密度比空气高且叶片旋转速度慢得多,水轮机面临的可靠性难题与风轮机存在明显差异。例如,施加在水轮机上的荷载、叶片空化和海水高浊度造成的磨损等更为显著^[66]。这些已被一些原型水轮机测试中发生的叶片故障所证实,如 Verdant Power 公司研发的 35 kW 水轮机在海试中折断了叶片^[67]。因此,设计高效水轮机叶片并准确预测其安全可靠对于潮流能产业的商业化至关重要。

早期设计潮流能水轮机时,多种技术指标主要参考了与水轮机类似的风力发电机,但对风轮机而言,与同等功率的潮流能水轮机相比,由于海水密度远高于空气密度,潮流能水轮机所受到的轴向力与力矩将会远大于风轮机,这严重影响了机组的正常运行和可靠性^[68]。潮流能水轮机载荷主要包括极限载荷和疲劳载荷,而载荷的根本来源是叶片,因此叶片的水动力学性能分析是载荷分析的重要基础^[69]。例如,Mccann^[70]分析了湍流与波浪对水轮机叶片疲劳荷载的影响,表明疲劳载荷对波浪作用较为敏感。因此,湍流和波浪的疲劳加载机制是整个水轮机设计过程中的重要考虑因素;波浪会导致作用在水轮机叶片上的荷载产生波动,前人在波流共同作用方面也做了相关研究,张继生等^[71]开展了物模试验,与纯水流条件相比,波浪的存在有利于支撑结构后方水流速度恢复,但是水轮机后方近尾流的湍流强度更大;Doong 等^[72]研究了波流联合载荷对潮流能水轮机的影响规律,联合载荷将可能改变单一常规载荷作用下的频率;Tatum 等^[73]模拟了潮流能水轮机在波流条件下的性能特征,研究表明由于轴向流速受波浪旋转分量的影响,功率和推力的波动幅度随着波高的增大而增大。同时,还有学者探讨了湍流强度与叶尖速比对推力系数与荷载波动的影响,结果发现湍流对水轮机推力系数以及叶片荷载波动有明显影响,提高水轮机叶尖速比会使叶片以及叶片根部弯矩的荷载波动增大。分析水轮机的运行稳定性时还需要充分考虑工程的实际海况,例如,王树杰等^[74]针对安装在斋堂岛海域的 500 kW 潮流能工程,模拟了实际海况条件下坐底式支撑结构的安全稳定性,验证了支撑结构在极端工况下运行时具有安全特性。潮流能水轮机通常安放在恶劣且复杂多变的海洋环境中,对发电装置的防污、防腐、密封、强度、稳定性等提出了更高的要求^[75],因此,水轮机载荷以及强度分析就显得尤为重要。水轮机如何以合适的结构和安全系数来满足其应有的水动力学性能是未来研究重点之一。

3.4 水轮机尾流效应

潮流能水轮机获取动能不仅会降低下游尾流动量,水轮机产生的水流扰动还会影响下游水轮机的寿命^[76]。对于形状较为复杂的水轮机,当水流流过时,其壁面上会形成边界层,流动会从边界层上发生分离,

并在水轮机下游产生漩涡区。因此,对于即将商业化应用的潮流能水轮机阵列,阐明尾流的流动特性是非常必要的,这将直接关系到水轮机阵列整体性能、水轮机寿命和能源成本。例如,Mycek 等^[77] 试验研究了湍流强度对水轮机性能及尾流特性的影响,随着湍流强度的增加,性能波动也会显著增强,这可能会对发电装置疲劳产生重大影响。湍流强度越大,尾流的恢复则越快,所以尾流的形状、长度与强度在很大程度上取决于上游的湍流条件。Bahaj 等^[78] 研究表明自由水面和海床的边界效应对垂直尾迹的扩散起到了一定抑制作用,圆盘下游尾流中的速度损失会随着下游距离的增加而逐渐恢复。对于 2 台并排布置的水轮机而言,横向间距、水轮机相对安装高度和来流速度都会使尾流的剖面发生变化^[79];Zhang 等^[80] 利用数值模拟与物理模型相结合的研究手段,分析了潮流能水轮机性能与流场特性,探讨了不同水轮机浸没深度时下游尾流结构及其对自由流速度分布恢复的影响。Wimshurst 等^[81] 模拟研究了海床地形对水轮机尾流场扩散的影响,海床坡度的变化会使尾流场产生偏移,支撑结构的存在也会对尾流场起到一定影响;在现实海洋环境中,往往伴随着波浪,Stallard 等^[82] 试验研究了波浪对尾流恢复影响,在试验中制造与水流方向相反的不规则波,用以增加周围流场中的速度波动,研究发现虽然波浪使得尾迹前半部分速度波动幅度增加 2 倍多,但尾流的横向和垂直剖面并没有实质性的改变。研究水轮机尾流场特性有助于提高潮流能转化效率,也可为水轮机阵列布局提供理论依据。

3.5 水轮机阵列布局

潮流能工程发展迅速,虽然当前项目多以单台水轮机为主,但未来将发展为开发水域内多排多列式的水轮机阵列模式,这样才能充分地开发利用海域。阵列布局通常受水深和水道宽度等因素的限制,而且能量提取和阵列形成的障碍可能导致阵列周围的水流转向,从而改变潮流的自然分布。水轮机布局对潮流能工程的功率输出有着重要影响,其关键在于多台水轮机之间的相互作用过程。有研究表明^[83],水轮机横向间隔为 2D、纵向间隔为 5D 为最佳间距,能使获能最大化。相邻叶轮直径相向旋转能使水轮机之间的旋转流体朝同一方向移动,这将降低剪应力和减少叶尖阻力,从而提高水轮机性能。Bai 等^[84] 模拟表明上游尾迹被下游截断,阵列最后一行的水轮机表现出更大的尾迹。在更大的间隔条件下,尾迹的混合程度减弱^[85]。如果工程海域具有更高湍流强度,水轮机尾流能更快地恢复至来流流速,使下游水轮机有更高的获能效率。对于推力系数而言,在高湍流强度下,前后布置的 2 台水轮机与单台水轮机推力系数曲线趋于相似;在低湍流强度下,推力系数曲线会低于单台水机。就尾流而言,较高湍流情况的主要优点是上游和下游水轮机的尾流非常相似^[86]。Gaurier 等^[87] 研究 3 台交错式布置水轮机在低湍流强度下,下游水轮机的功率系数相比单台有所提升,但在相同布局下,高湍流强度会使下游水轮机功率系数下降。作者还对不同布局形式的阵列进行了实验,发现下游水轮机相对于前排水轮机在布局轴上的微小变化可能导致下游水轮机性能明显下降。水轮机阵列如果能结合实地潮流资料进行布局,将有利于提高获能效率,例如结合舟山海域的实测资料,优化后水轮机的获能比常规布局有着较为显著的提升^[88]。Culley^[89] 使用 OpenTidalFarm 对特定海域中水轮机阵列密度进行了优化模拟,结果表明较低的水轮机密度(介于场区内可支持的最大密度在 20% ~ 40% 之间)可最大程度地降低开发商的安装成本,并增加潮流能的投资回报。Zhang 等^[90] 也基于 OpenTidalFarm 模拟不同阵列布局与优化布局后的获能情况,研究表明水轮机阵列横向间距减小而纵向间距增大时,可以提取更多的潮流能量。通过优化水轮机的阵列布局来获得更多能量是当前潮流能开发利用的主要方向之一,但多台水轮机所带来的累积效应也不容忽视。

3.6 环境影响效应

虽然潮流能是无污染、无碳排放的绿色清洁能源,但其开发利用过程中也会带来潜在的环境影响效应,这点仍需引起人们足够的重视。在能量提取过程中,也会改变所在流域的流速、湍流强度等参数,并对水底环境造成一定的影响,主要包括了泥沙输移和对水下生物的影响。多数研究表明,单台水轮机带来的环境影响是相对较低的,但水轮机阵列所带来的累积效应将是不可忽略的。例如,水轮机的存在将使得水轮机的尾流流速下降,水轮机两侧流速显著增加。由于泥沙输移的 2 种方式(推移质和悬移质)皆为流速的一个高阶函数^[91],因此即使水流速度的变化相对较小,也可能对泥沙输运过程产生一定的影响。相应地,改变泥沙侵蚀、沉积模式和海床高程可能会对海床生态系统带来新的影响^[83]。对于具备海岸防护作用的海下沙坝,300 MW 潮流能水轮机阵列对其产生变化的规模对比自然变化将是显而易见的^[92]。大型阵列还可能对阵列远场环境产生显著影响,研究表明,阵列内部、上游和下游的流速可能大幅降低,并对泥沙输送和生物哺育现

状造成相应的变化。同时,水轮机运行噪音对水下生物和附着于悬浮泥沙的细菌也有一定影响^[93]。例如, Lossent 等^[94]发现在水轮机布置区域 1km 范围内,可能会对某些海洋生物带来行为障碍。基于潮流环境周围生物栖息的调查,水轮机在安装使用过程中,有可能对鱼类和哺乳动物造成碰撞伤害;运行过程中带来的噪音也会对鲸类、鳍足类等生物产生干扰^[95]。Malinka 等^[96]对小于 2 MW 的潮流能发电站进行了一项试点试验,评估水下噪音监测系统的可行性,对拟建水轮机附近海洋哺乳动物的声学监测及影响分析提供了数据支撑。其他环境影响如水下电缆安装^[97]带来的感应电磁场也被认为是潜在的环境问题。此外,水轮机在安装运行过程中润滑油、液压油等泄漏溢出对水质和海洋生物的影响,以及防污涂层释放的有毒污染物等问题还需进一步探究。即使潮流能开发利用行业已准备好进行商业规模的部署,但对海洋环境影响的确定性和重要性仍相对未知。因此,需要加快研究潮流能工程可能带来的负面环境效应及其应对措施,不走“先破坏、再治理”的老路,并建立相应的环境影响评价体系。

4 结 语

潮流能作为海洋可再生能源的重要组成部分,其储量丰富且可持续利用,具有很大的发展潜力。潮流能资源主要分布在海岬、岛屿及河口区域,这对有着漫长海岸线和众多岛屿的我国有着巨大的吸引力。目前,许多机构、高等学校和企业已经开始对潮流能发电装置进行深入研究并建设了示范工程,预计在不久的将来会取得快速发展。本文总结了潮流能资源的分布现状,梳理了潮流能发电装置的分类,介绍了当前国内外主要的潮流能示范工程。我国已经为潮流能商业化做了大量的准备,但还面临着诸多难题。(a)虽然我国早在 1978 年就开始研究潮流能,但直到 21 世纪,政府部门才开始系统规划海洋能产业,为避免海洋能规章制度与产业现状的脱节阻碍我国潮流能产业未来的发展,需尽快拟定针对该领域的专项法律草案;(b)当前主要使用的几种潮流能资源评估方法结果存在一定差异,只能满足初步的预测需求,为更好地了解 and 利用资源储量,需进一步完善评估方法;(c)随着潮流能行业的发展,经济性是首要考虑的问题之一,不同的水轮机支撑结构对成本的占比有较大差异,如何在特定海域选用合理的水轮机结构,使其保证水轮机在复杂工况下安全运行是关注的重点;(d)无论布置多能互补式平台还是单类型潮流水轮机,只有在海中进行阵列式多点布放,才能高效地利用海域,但是阵列布局对周围流场产生的影响以及随之带来水动力环境的改变也是不可忽视的问题;(e)潮流能开发过程中带来的生态环境效应尚未明确,水轮机装置与海洋生物及其生境的相互作用还需进一步探究,并研发相应的技术以确保构建良好的水下生态。尽管潮流能发电当前正面临着各种各样难题与挑战,但其长远的经济效益及环保效益都难以估量,因此,加大对潮流能开发利用的研究和建设势在必行。

参考文献:

[1] LAMY J V, AZEVEDO I L. Do tidal stream energy projects offer more value than offshore wind farms? A case study in the United Kingdom[J]. Energy Policy, 2018, 113:28-40.

[2] FRAENKEL P. Marine current turbines: feedback on experience so far[EB/OL]. [2004-12-20]. <https://doc.docsou.com/b5343053c4cb12464c017a784.html>.

[3] 国家发展和改革委员会, 国家海洋局. 全国海洋经济发展“十三五”规划报告[R]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家海洋局, 2017.

[4] BAHAJ A S, MYERS L E. Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production[J]. Renewable Energy, 2003, 28(14):2205-2211.

[5] NASH S, PHOENIX A. A review of the current understanding of the hydro-environmental impacts of energy removal by tidal turbines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 80:648-662.

[6] Atlantis Energy Ltd. Marine Current Turbines[R]. Singapore:Atlantis Energy Ltd.,2016.

[7] 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]. Advances in Marine Science, 2008, 26(1):98-108. (in Chinese))

[8] BLACK & VEATCH CONSULTING, Ltd. UK, Europe, et al. Marine energy challenge[R]. London:Carbon Trust,2004.

[9] BRYDEN I G, COUCH S J. ME1-marine energy extraction: tidal resource analysis[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2):133-

- 139.
- [10] GARRETT C, CUMMINS P. Generating power from tidal currents[J]. *Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 2004, 130(3):114-118.
- [11] VENNELL R. Tuning tidal turbines in-concert to maximise farm efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 671:587-604.
- [12] The European Marine Energy Centre Ltd. . Assessment of marine tidal energy resource[R]. Stromness:The European Marine Energy Centre Ltd. , 2009.
- [13] IYER A S, COUCH S J, HARRISON G P, et al. Variability and phasing of tidal current energy around the United Kingdom [J]. *Renewable Energy*, 2013, 51:343-357.
- [14] BLUNDEN L S, BAHAJ A S. Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(2): 121-132.
- [15] MURRAY R O, GALLEGO A. A modelling study of the tidal stream resource of the Pentland Firth, Scotland[J]. *Renewable Energy*, 2017, 102(B):326-340.
- [16] DRAPER S, ADCOCK T A A, BORTHWICK A G L, et al. Estimate of the tidal stream power resource of the Pentland Firth [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63:650-657.
- [17] DEFNE Z, HAAS K A, FRITZ H M, et al. National geodatabase of tidal stream power resource in USA[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5):3326-3338.
- [18] CAMPBELL R, MARTINEZ A, LETETREL C, et al. Methodology for estimating the French tidal current energy resource[J]. *International Journal of Marine Energy*, 2017,19:256-271.
- [19] ADCOCK T A A, DRAPER S, HOULSBY G T, et al. The available power from tidal stream turbines in the Pentland Firth[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, 469: 20130072.
- [20] FALCAO A F, DE O. Joule II preliminary action: European pilot plant study[R]. Palo Alto:Proc European Wave Energy Symp,1993.
- [21] 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) devices[R]. Palo Alto:EPRI North American Tidal in Stream Power Feasibility DemonstrationPproject, 2006.
- [22] CORNETT A, TABOTTON M. Inventory of Canadian Marine Renewable Energy Resources[R]. Ontario:Report to Canadian Hydraulics Centre National Research Council Canada and Michael Tarbotton Triton Consultants Ltd. , 2006.
- [23] Ocean Renewable Energy Group. Charting the course Canada 's marine renewable energy technology roadmap[R]. Ontario: Natural Resources Canada,2011.
- [24] KIM G, LEE M E, LEE K S,et al. An overview of ocean renewable energy resources in Korea[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4):2278-2288.
- [25] LI D, WANG S, YUAN P. An overview of development of tidal current in China: Energy resource, conversion technology and opportunities[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*,2010, 14(9):2896-2905.
- [26] 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 Fang, YU Huaming, BAO Xianwen, et al. Analysis of tidal current energy in Zhoushan Sea Area based on high resolution numerical modeling[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2014,35(1):125-133. (in Chinese))
- [27] 金永德,赵新. 福建莆田南日岛附近海域潮流能估算[J]. *海洋湖沼通报*, 2019, 166(1):7-12. (JIN Yongde, ZHAO Xin. Tidal stream energy assessment near Nanri Island in Putian, Fujian[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, 166(1):7-12. (in Chinese))
- [28] 武贺,赵世明,张松,等. 老铁山水道潮流能初步估算[J]. *海洋通报*, 2011, 30(3):310-314. (WU He, ZHAO Shiming, ZHANG Song, et al. Preliminary assessment of tidal energy in Lao Tieshan channel, marine science bulletin[J].2011, 30(3): 310-314. (in Chinese))
- [29] 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. (WU Lunyu, WANG Xing,XIONG Xuejun. Assessment of tidal stream energy in the Bohai Strait using a high resolution model[J]. *Advances in Marine Science*,2013, 31(1):12-21. (in Chinese))
- [30] 杨利利. 山东半岛潮流能资源评估[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
- [31] 武贺,丁杰,姜波,等. 琼州海峡潮流能资源初步分析与估算[C]//国家海洋技术中心. 中国海洋可再生能源发展年会暨论坛. 北京:国家海洋技术中心,2013 :611-620.

- [32] 王传崑,施伟勇. 中国海洋能资源的储量及其评价[C]//中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会. 中国可再生能源学会海洋能专业委员会成立大会暨第一届学术讨论会论文集. 杭州:中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会,2008:171-181.
- [33] 韩家新. 中国近海海洋:海洋可再生能源[M]. 北京:海洋出版社,2015.
- [34] 白杨,侯二虎,杜敏. 潮流能发电装置研究进展[C]//中国海洋工程咨询协会. 中国海洋可再生能源发展年会暨论坛. 威海:中国海洋工程咨询协会,2015:433-439.
- [35] 彭伟,麻常雷,王海峰. 中国海洋能产业发展年度报告2019[M]. 北京:海洋出版社,2019.
- [36] NG K W, LAM W H, NG K C. 2002-2012: 10 years of research progress in horizontal-axis marine current turbines[J]. *Energies*, 2013, 6(3): 1497-1526.
- [37] 张亮,房良,张学伟. 水平轴潮流能水轮机空化特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(2):50-54. (ZHANG Liang, FANG Liang, ZHANG Xuewei. Study on cavitation characteristics of horizontal axis tidal turbine[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2015,43(2):50-54. (in Chinese))
- [38] 李允武. 海洋能源开发[M]. 北京:海洋出版社,2008.
- [39] CORSEATA T D, MAGAGNA D. Overview of European innovation activities in marine energy technology[R]. Petten, Netherlands: European Commission Institute for Energy and Transport, 2013.
- [40] 陈存福. 潮流能水平轴水轮机叶片优化及水动力性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
- [41] 张亮,李志川,张学伟,等. 垂直轴潮流能水轮机研究与利用现状[J]. 应用能源技术,2011(9):1-7. (ZHANG Liang, LI Zhichuan, ZHANG Xuewei et al. The status of research and application of vertical axis tidal turbine[J]. *Applied Energy Technology*,2011(9):1-7. (in Chinese))
- [42] MINUTE R P. Vertical axis tidal current turbine: advantages and challenges review[J]. *Science and Engineering*, 2016, 3:64-71.
- [43] KIRKE B K, LAZAUSKAS L. Limitations of fixed pitch darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(3):893-897.
- [44] ZEINER-GUNDERSEN D H. A novel flexible foil vertical axis turbine for river, ocean, and tidal applications[J]. *Applied Energy*, 2015, 151(1):60-66.
- [45] 王俊芳. 二维振荡水翼的水动力特性分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [46] XIAO Q, ZHU Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 46: 174-191.
- [47] MASON-JONES A, O'DOHERTY D M, MORRIS C E, et al. Influence of a velocity profile & support structure on tidal stream turbine performance[J]. *Renewable Energy*, 2013, 52: 23-30.
- [48] JEFFREY H, SEDGWICK J, GERRARD G. Public funding for ocean energy: a comparison of the UK and U. S. [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2014, 84:155-170.
- [49] Ocean Energy Europe. Ocean Energy Key trends and statistics 2019[R]. Brussels:Ocean Energy Europe, 2019.
- [50] ELGHALI S E B, BENBOUZID M E H, CHARPENTIER J F. Marine tidal current electric power generation technology: state of the art and current status[C]// IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Antalya:IEEE,2007: 1407-1412.
- [51] 张亮,李新仲,耿敬,等. 潮流能研究现状2013[J]. 新能源进展,2013(1):57-72. (ZHANG Liang, LI Xinzhong, GENG Jing,et al. Tidal current energy update 2013[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2013(1):57-72. (in Chinese))
- [52] MILLER F P, VANDOME A F, MCBREWSTER J. European marine energy centre[M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2010.
- [53] 吕忻. 潮流能资源调查与评估标准研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [54] 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 resource at Putuo Mountain-Hulu Island waterway[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017,35(10):1566-1573. (in Chinese))
- [55] KARSTEN R H, MCMILLAN J M, HAYNES R D. Assessment of tidal current energy in the Minas Passage, Bay of Fundy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy*, 2008, 222(A5):493-507.
- [56] TARBOTTON M, LARSON M. Canada ocean energy atlas (phase 1) potential tidal current energy resources analysis background[R]. Vancouver:Report to Canadian Hydraulics Centre, 2006.
- [57] JO C H, LEE J H, RHO Y H, et al. Performance analysis of a HAT tidal current turbine and wake flow characteristics[J]. *Renewable Energy*, 2014, 65:175-182.

- [58] LIU J, LIN H, PURIMITLA S R. Wake field studies of tidal current turbines with different numerical methods[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 117:383-397.
- [59] JO C H, JIN Y Y, KANG H L, et al. Performance of horizontal axis tidal current turbine by blade configuration[J]. *Renewable Energy*, 2012, 42: 195-206.
- [60] SEO J, LEE S J, CHOI W S, et al. Experimental study on kinetic energy conversion of horizontal axis tidal stream turbine[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 784-797.
- [61] 康海贵,谢宇,陈兵,等. 一种新型垂直轴潮流能水轮机性能的初步研究[J]. *可再生能源*, 2014, 32(9): 1385-1390. (KANG Haigui, XIE Yu, CHEN Bing, et al. A preliminary study on a novel vertical axis tidal current turbine[J]. *Renewable Energy Resources*, 2014, 32(9):1385-1390. (in Chinese))
- [62] 徐锦才,董大富,张巍. 可再生能源多能互补发电综述[J]. *小水电*, 2007(3):12-14. (XU Jincai, DONG Dafu, ZHANG Wei. General of synergy power generation of renewable energy[J]. *Small Hydro Power*, 2007(3):12-14. (in Chinese))
- [63] 高杰. 潮流能风能互补发电装置载荷及运动响应研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2016.
- [64] 施伟,宁德志,周林,等. 基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统;中国, CN207485595U[P]. 2018.
- [65] VIJAYA M. Gorlov Helical Turbine and the process of Energy Generation[M]. Berlin:Research Gate, 2016.
- [66] FRAENKEL P L. Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, 221(2): 159-169.
- [67] LI W, ZHOU H, LIU H, et al. Review on the blade design technologies of tidal current turbine[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 414-422.
- [68] 甄飞. 水平轴潮流能发电装置轴向力分析及试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [69] 徐全坤. 水平轴潮流能发电机组载荷分析与控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [70] MCCANN G. Tidal current turbine fatigue loading sensitivity to waves and turbulence;a parametric study[C]//*Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*. Portugal :Porto,2007: 86-96.
- [71] 张继生,曹运修,吴修广,等. 并排水平轴潮流能水轮机组水动力特性研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017,45(3):256-262. (ZHANG Jisheng, CAO Yunxiu, WU Xiuguang, et al. Investigation of hydrodynamic characteristics around parallel-arranged horizontal-axis tidal stream turbines[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2017,45(3):256-262. (in Chinese))
- [72] DOONG D J, LEE B C, KAO C C. Wave measurements using GPS velocity signals[J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 1043-1058.
- [73] TATUM S C, FROST C H, ALLMARK M, et al. Wave-current interaction effects on tidal stream turbine performance and loading characteristics[J]. *International Journal of Marine Energy*, 2016, 14(14):161-179.
- [74] 王树杰,张以俊,袁鹏,等. 座底式潮流能发电装置支撑结构稳定性与可靠性分析[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(11):3049-3056. (WANG Shujie, ZHANG Yijun, YUAN Peng, et al. Stability and reliability analysis of seabed seated supporting structure of tidal current energy generation device[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(11):3049-3056. (in Chinese))
- [75] BLACKMORE T, MYERS L E, BAHAJ A B S. Effects of turbulence on tidal turbines: Implications to performance, blade loads, and condition monitoring[J]. *International Journal of Marine Energy*, 2016, 14: 1-26.
- [76] MYERS L E, BAHAJ A S. An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays[J]. *Renewable Energy*, 2014, 37(1):28-36.
- [77] MYCEK P, GAURIER B, GERMAIN G, et al. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I: one single turbine[J]. *Renewable Energy*, 2014, 66: 729-746.
- [78] BAHAJ A S, MYERS L E, THOMSON M D, et al. Characterising the wake of horizontal axis marine current turbines[C]//*Proceedings of the 7th European wave and tidal energy conference*. Winchester:University of Southampton Porto Portugal, 2007: 9-20.
- [79] 张继生,张婧,王日升,等. 波流共同作用下水平轴潮流能水轮机水动力特性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(2):85-92. (ZHANG Jisheng, ZHANG Jing, WANG Risheng, et al. Investigation on the hydrodynamics around a tidal stream turbine of horizontal axis under the combined action of wave and current[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)* 2019, 47(2):85-92. (in Chinese))
- [80] ZHANG Y, ZHANG J, ZHENG Y, et al. Experimental analysis and evaluation of the numerical prediction of wake characteristics of tidal stream turbine[J]. *Energies*, 2017, 10(12): 2057.
- [81] WIMSHURST A, WILLDEN R. Tidal power extraction on a streamwise bed slope[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 125(1):70-81.
- [82] STALLARD T, COLLINGS R, FENG T, et al. Interactions between tidal turbine wakes: experimental study of a group of three-

- bladed rotors[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, 371:20120159-20120159.
- [83] NEILL S P, JORDAN J R, COUCH S J. Impact of tidal energy converter (TEC) arrays on the dynamics of headland sand banks [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 387-397.
- [84] BAI L, SPENCE R R G, DUDZIAK G. Investigation of the influence of array arrangement and spacing on tidal energy converter (TEC) performance using a 3-dimensional CFD model [C]//*Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*. Uppsala:Uppsala University, 2009: 654-660.
- [85] O'DOHERTY D M, MASON-JONES A, MORRIS C, et al. Interaction of marine turbines in close proximity [C]//*9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*. LONDON: Southampton, 2011: 10-14.
- [86] MYCEK P, GAURIER B, GERMAIN G, et al. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part II: two interacting turbines [J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 876-892.
- [87] GAURIER B, CLÉMENT C, GRÉGORY G, et al. Three tidal turbines in interaction: An experimental study of turbulence intensity effects on wakes and turbine performance [J]. *Renewable Energy*, 2020, 148:1150-1164.
- [88] 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):240-245. (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):240-245. (in Chinese))
- [89] CULLEY D. The modelling and design optimisation of tidal stream turbine arrays [D]. London:Imperial College, 2016.
- [90] ZHANG C, ZHANG J, TONG L, et al. Investigation of array layout of tidal stream turbines on energy extraction efficiency [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196:106775. 1-106775. 12.
- [91] NEILL S P, LITT E J, COUCH S J, et al. The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2803-2812.
- [92] MARTIN-SHORT R, HILL J, KRAMER S C, et al. Tidal resource extraction in the Pentland Firth, UK: Potential impacts on flow regime and sediment transport in the Inner Sound of Stroma [J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 596-607.
- [93] AHMADIAN R, FALCONER R, BOCKELMANN-EVANS B. Far-field modelling of the hydro-environmental impact of tidal stream turbines [J]. *Renewable Energy*, 2012, 38(1): 107-116.
- [94] LOSSENT J, LEJART M, FOLEGOT T, et al. Underwater operational noise level emitted by a tidal current turbine and its potential impact on marine fauna [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 131: 323-334.
- [95] O'CARROLL J, KENNEDY R, CREECH A, et al. Tidal Energy: the benthic effects of an operational tidal stream turbine [J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 129:277-290.
- [96] MALINKA C, HAY A, CHEEL R. Toward acoustic monitoring of marine mammals at a tidal turbine site: Grand Passage, NS, Canada [C]//*European Wave and Tidal Energy Conference*. Nantes: EWTEC, 2015: 1-10.
- [97] WESTERBERG H, LAGENFELT I. Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2008, 15(5/6):369-375.

(收稿日期:2020-08-11 编辑:张志琴)