美国 NNMREC 对我国海洋能试验场建设的启示*

韩林生，王鑫，路宽

（国家海洋技术中心　天津　300112）

摘要：美国西北国家海洋可再生能源中心（Northwest National Marine Renewable Energy Center，NNMREC）是美国国家能源局成立的从事波浪能与潮流能开发的科研机构，目前它在波浪能和潮流能开发利用技术方面开展了许多卓有成效的工作。文章主要介绍了 NNMREC 在波浪能和潮流能领域的研究成果和目前开展的主要工作，并重点介绍了其太平洋海洋能源中心、移动测试平台及海洋能装置环境监测等方面的技术现状，旨在对我国的波浪能和潮流能开发利用技术尤其是海洋能试验场的建设提供积极的参考和借鉴。

关键词：波浪能；潮流能；NNMREC；海洋能试验场

中图分类号：P743　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2015)07－0023－04

21 世纪以来，努力发展可再生能源已成为国际社会的共识，我国同样也加大了对可再生能源开发方面的支持。近年来，在国家政策和资金的帮助下，我国的海洋可再生能源开发利用工作取得了很大的进步，尤其是波浪能和潮流能开发利用技术方面，各种基于波浪能和潮流能的海洋能发电装置层出不穷[1－2]。但随着各类海洋能发电装置陆续研发成功，如何规范、有效地对其发电能力和工作性能进行海上测试与评价成为新的难题。我国《海洋可再生能源发展纲要（2013－2016）》明确提出“到 2016 年，分别建成具有公共试验测试泊位的波浪能、潮流能示范电站以及国家级海上试验场，为我国海洋能的产业化发展奠定坚实的技术基础和支撑保障”[3]。因此，建设针对海洋能发电装置海上试验与测试的海上试验场迫在眉睫。

1　NNMREC 概述

美国西北国家海洋可再生能源中心成立于 2008 年，是由美国国家能源局支持成立的 3 个国家海洋可再生能源中心之一，主要致力于波浪能与潮流能的开发利用技术。此外，还有夏威夷国家海洋可再生能源中心和东南国家海洋可再生能源中心，分别负责温差能、洋流能技术的研究与推广。

NNMREC 主要由俄勒冈州立大学与华盛顿大学合作组成，旨在推动波浪能、潮流能技术的研究与发展，促进其产业化。其中，俄勒冈州立大学主要从事波浪能技术方面的工作，华盛顿大学则主要负责潮流能方向。二者与美国国家可再生能源实验室一起合作，通过相关研究工作的开展，弥补目前在波浪能、潮流能开发和利用技术领域的空白，并研究波浪能、潮流能资源的开发对环境和人类活动的影响，使民众及政府了解波浪能、潮流能技术带来的机遇与挑战。NNMREC 希望最终打造一个面向美国和全世界的波浪能、潮流能技术综合测试与科研中心。

2　波浪能领域

NNMREC 在俄勒冈州立大学主要进行波浪能技术的研究与推广，其任务和目标是：支持有发展潜力的波浪能研究技术进行实海况实验；研究波浪能产业可能带来的对社会经济、环境、生态的影响；通过科研、教育等培养海洋能领域的人才，促进海洋能技术的进步；支持发展新一代的波浪能转换技术。

2.1　NNMREC 在波浪能领域开展的研究工作

波浪能发电技术商业化主要面临两个关键

* **基金项目**：海洋可再生能源专项资金项目（GHME2012ZC02，GHME2013ZC01）.

问题：一是装置是否具有良好的可靠性和环境适应性，能在大多数海区实现长期布放；二是发电效率，即其发电量与成本造价能否满足商业化运营的需求。这些问题与发电能力、发电原理、锚泊系统设计、装置的可靠性与环境适应性、可预测性（波浪能预报）以及电能蓄能并网等问题息息相关。

（1）评估海洋能发电装置对环境和生态系统的影响。主要是研究发电装置本身及其产生的声学、电磁学效应对海岸带环境、海底沉积物输运、海洋哺乳动物、鱼类等带来的影响，其中的部分研究可以通过数值模拟进行前期探索，之后通过水槽试验和实海况试验进一步验证。

（2）优化发电装置和阵列在海洋中的布放。通过海洋调查观测和数值模式研究可以得到局地波浪能的分布规律，便于波浪能装置及其阵列的布放，进一步研究发电装置和阵列对海洋波浪场的影响、波浪对发电装置及其电能捕获能力的影响，并研究装置与环境二者之间的相互影响与反馈机制。

（3）提高电能预报和资源评估的能力。通过提高对波浪的预报，实现对波浪能资源的预报和评估，帮助获取通过发电装置或阵列的波形，从而预测装置或阵列的发电量，为下一步的电能输送和并网提供安全预警和保障。

（4）提升发电装置的可靠性和环境适应性。通过研发抗生物污损的材料、合理设计锚定系统、优化机械连接构件、实现装置反向运行等提升装置的可靠性和生存能力。

（5）加强与公众的合作与沟通，积极组织参与公共演讲、展览，并支持海洋能发电与公共政策、服务方面的相关研究，从而获得公众和政府的支持及社会的经济投入。

2.2 波浪能试验与测试场

NNMREC 在俄勒冈州 Newport 附近的太平洋海岸建立了太平洋海洋能源中心（Pacific Marine Energy Center，PMEC），用于波浪能装置的试验与测试，并通过支持海洋能技术研发机构对其设备进行实海况试验来推进海洋可再生能源技术的进步。

PMEC 测试场址选在 Newport 海域的优势有：波浪资源非常丰富；有便捷的电力传输设施用于波浪能发电并网；当地政府十分支持，并将波浪能列入了当地海域使用规划和政府的 10 年能源规划；拥有发达的制造业，可以满足波浪能产业的各种需求；有一个非盈利性公私合营的组织 Oregon Wave Energy Trust，引导并支持波浪能技术的研发与进步；是 NNMREC 的所在地，是全美波浪能研究与测试中心。

PMEC 目前主要由其北部和南部能源测试场组成：

（1）北部能源测试场（North Energy Test Site，NETS）。2012 年，NNMREC 开放了其北部能源测试场，它位于俄勒冈州 Yaquina Head 外海 2.5 n mile 的海上，在 Newport 的北部，是一个单边长 1 n mile 的矩形区域，该区域水深 45～55 m，海底为缓坡沙底。夏季有效波高 1～2.5 m，周期 6～9 s，冬季有效波高 2～5 m，周期 8～12 s，历史最大有效波高 7～14 m。该测试场并未实现并网，而是通过一个海上移动测试平台 Ocean Sentinel 对波浪能设备进行相关试验和测试，并可满足最大功率 100 kW 的波浪能设备的测试需要，测试时间为每年的 5—10 月，在其他时间也可满足用户对设备其他诸如环境适应性、生物污损、锚泊系统、环境影响等方面的测试。

2012 年，NETS 通过移动测试平台 Ocean Sentinel 首次对 20 kW 的波浪能设备 WET-NZ 进行了 6 周的测试，获取了其发电量、装置工作性能及环境影响等方面的数据和资料。

（2）南部能源测试场（North Energy Test Site，SETS）。NNMREC 目前正在 Newport 的南部海域建立其南部能源测试场，其离岸约 5 n mile，这将是美国第一个可以进行原型样机试验并实现并网的波浪能试验与测试场，SETS 预计在 2016 年建成。SETS 规划了 4 个波浪能测试泊位，用于对波浪能发电装置或由其组成的小型阵列进行测试，测试泊位通过海底电缆与岸基设施相连，进而并入公共电网。岸基设施用于收集发电设备的测试数据和波浪环境数据，提供办公环境和实验操作空间，同时有一个面向大众的小型公共展区。

2.3 移动测试平台 Ocean Sentinel

Ocean Sentinel 是一个基于船型浮标的 6 m 直径的移动海上测试平台，可以对非并网模式的波浪能装置进行测试。它与 NETS 的测试站位

相距 100 m 左右，通过一根电力和通信复合电缆与波浪能装置相连，并通过无线通信方式与海洋环境观测设备、岸基控制中心相沟通[4]。其具体功能包括：① 电能分析与电力消耗，测量发电装置的电流、电压等电气参数，并通过负载将多余的电力消耗掉；② 海洋环境数据获取，包括波浪、潮流和风等的实时观测数据；③ 视频监控及锚泊力、系留力和其他测量参数。

此外，Ocean Sentinel 还可以通过太阳能电池板供电，其目前可测试最高功率 100 kW 的波浪能设备，并可进行进一步拓展。

考虑到海况因素，Ocean Sentinel 通常在每年的 5—10 月之间进行波浪能发电装置测试任务，在此期间通过三点锚泊系留方式保证其位置的相对固定，以确保与测试装置的电缆连接安全。在其他月份则主要进行海洋环境监测任务，并采用单点锚泊系留的方式以适应恶劣的海况。

3　潮流能领域

NNMREC 主要由华盛顿大学负责推动潮流能领域的科学研究与发展，其任务和目标包括：通过支持海洋能领域的基础研究，解决海洋能工程领域的技术问题并研究对生态环境和人类活动的影响等，从而弥补海洋能领域的相关空白；为美国培养海洋能领域下一代的科研工作者、技术工程师和教育工作者；通过制定海洋能装置评价与准入相关标准促进海洋能装置的产业化与商品化；获得管理者与政府政策的理解与支持，吸引工业领域、科研领域的关注和投入。

3.1　NNMREC 在潮流能领域开展的研究工作

研发和测试对试验区环境、潮流能装置进行监测与评估的经济型设备仪器和观测手段。用于测量潮流能发电装置在平流、湍流状态下的发电性能；测量水轮机及其周边的流场与尾迹情况；测量装置和环境的声学环境；监控周边鱼类和海洋哺乳动物的情况等。实现对试验区更全面、更持久的监测，从而可以更方便地对潮流能测试场海域的物理环境、生态环境和潮流能装置的性能进行评估。

发电装置及阵列的优化设计与布放研究。研究确定合适的装置布局方向和阵列布放密度，保证既能有效发挥装置性能和充分利用潮流能资源，又不会对周边海洋环境产生不良影响至关重要。通过该研究的最终目标是希望将来能制定发电装置合理布局与布放密度的相关标准。

潮流能装置对环境的影响包括：① 潮流能装置布放后其本身及附属结构对海洋环境的影响，如对装置周边流场、底部沉积物输运等产生影响；② 潮流能装置的动力学影响，包括浆叶运动、夹卷、冲击、尾流等，会对小范围海域流场、泥沙输运、潮间带变迁、底栖生物和鱼群物种带来影响；③ 化学影响，包括装置的润滑剂、颜料、各类涂层等产生的化学污染对生物的影响；④ 声学影响，主要是装置运行噪声对海洋哺乳动物和部分鱼类产生的影响；⑤ 电磁影响，发电机和电缆等引起的电磁场改变对海水生物的影响。

通过新技术和新材料的应用提高发电装置的可靠性和环境适应性。华盛顿大学对可用于发电机转子、驱动装置和其他配件的各种材料（包括玻璃钢、碳纤维钢、不锈钢、铝、结构钢、普通钢等）以及各种防生物附着、防腐蚀的涂料进行了实海况的海底实验，对其生物污染和腐蚀情况进行了研究分析。结果表明，表面更光滑的材料生物附着情况更轻，有防生物涂层的材料抗生物污染效果显著，不锈钢、碳纤维钢材具有良好的防腐蚀性能。此外，还对不同材料的抗氧化性能进行了研究。

3.2　海洋环境监测与测试设备

海洋能发电装置的测试评估及其环境影响评价对海洋环境要素的监测提出了更高的要求，如需要根据试验测试时间调整数据采样间隔、某些海洋能发电检测需要长时间连续观测等，针对这些特殊要求，需要有针对性地设计新的海洋仪器监测平台或手段。

华盛顿大学与 OpenHydro 等单位合作研制了环境监测平台（Adaptable Monitoring Package，AMP），该平台与海洋能发电设备相连，并通过电缆与岸上相通，实现了对发电装置及海洋环境的实时监测，并设计利用 ROV 实现其回收和重新布放；还与其他合作单位一起，开发研制了“海蜘蛛”仪器三脚架，可以搭载三维立体视频采集系统、声学相机、ADCP、CTDO、沉积物位移监测设备、声学释放器等，主要用于观测潮流能装置布放海域的物理和生物海洋环境特征。

对于进行独立长期观测的设备来说，电能不

足往往是制约观测时间和数据采集频率的重要因素之一，华盛顿大学的 NNMREC 研发了一套微缩的垂直轴潮流能发电装置，其平面面积小于 1 m^2，通过一个蓄电池组可持续提供 10～20 W 的电能。该装置可以安装到“海蜘蛛”三脚架上实现对其供电，从而可以使其提高采集频率和数据质量，并实现更长时间的环境监测(图 1)。

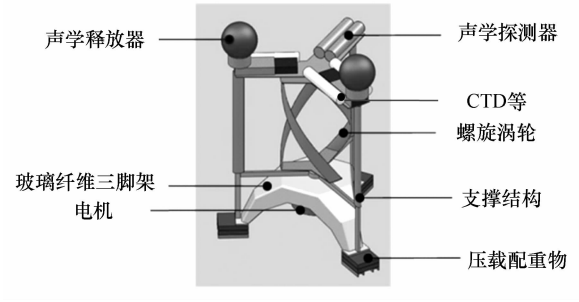

图 1 “海蜘蛛”加装微型潮流能发电装置设计

4 NNMREC 的实验室与科研资源

NNMREC 还有诸多先进的实验室合作一起从事波浪能、潮流能装置的研发、试验和测试，支持波浪能、潮流能装置关键技术的研究和等比例尺模型试验等[5]。

(1)Wallace Energy Systems & Renewables Facility，是位于俄勒冈州立大学的电力能源系统和可再生能源研究测试中心，已有 11 种波浪能发电设备在此进行过试验和测试。

(2)The O. H. Hinsdale Wave Research Laboratory，是一个达到世界水平的海岸工程和近岸科学领域的实验室，有一个 104 m 长的长波水槽和多功能波浪水池，曾进行过 1∶15 和 1∶33 比例的波浪能发电装置试验。

(3)Hatfield Marine Science Center，主要用于海洋与河口领域的科学研究和教育工作。

(4)华盛顿大学的 Applied Physics Laboratory，是专门从事近岸与小尺度海洋学以及浅水环境研究的实验室。

5 对我国波浪能、潮流能开发的启示

NNMREC 能源中心的建设虽然尚未完成，但其目前开展的卓有成效的工作对我国波浪能、潮流能的开发具有重要的借鉴意义：

(1)波浪能、潮流能产业技术的发展和进步需要有一系列公共服务支撑体系的建立与支持。海洋能装置的研发过程为：理论研究与数模设计论证－水槽试验模型验证－小比例尺模型海上试验－原型机海上试验等，建立一套与这一过程相配合的公共服务体系，如专业的海洋能水槽实验室、海洋能装置海上试验场等，可以有效地缩短研发周期、加速海洋能装置的实海况试验与定型，从而推进波浪能、潮流能产业的整体进步。

(2)波浪能、潮流能发电装置的试验、应用与推广，必须首先评估其对环境的影响。海洋能发电装置本身及其工作特性都会对周边海岸带环境、海洋生物群落、物质输运等产生一定的影响，研究这些影响的原理、机制并控制其影响范围，防止对周围环境造成不可逆转的危害。

(3)研发针对波浪能潮流能发电装置试验与测试的检测设备、环境检测设备等，将有助于发电装置试验与测试的方便开展。如移动测试平台 Ocean Sentinel，在不能并网的情况下满足了波浪能发电装置的部分试验与测试需求。

(4)充分依托高校、研究所相关研究机构进行研发和试验工作，利用其实验室技术设施、技术人员和科研力量完善研发过程。

(5)加强公共宣传，积极参与各项社会活动，获取民众的理解与支持以及政府、社会的投入。

参考文献

[1] 罗续业，夏登文．海洋可再生能源开发利用战略研究报告[M]．北京：海洋出版社，2014.

[2] 国家海洋技术中心．中国海洋能技术进展 2014[M]．北京：海洋出版社，2014.

[3] 国家海洋局．海洋可再生能源发展纲要(2013－2016)[Z]．2013.

[4] AMON E，BREKKEN TKA，VON J A. A power analysis and data acquisition system for ocean wave energy device testing[J]. Renew Energy，2011，36：1922－1930.

[5] BREKKEN TKA，RHINEFRANK K，VON J A，et al. Scaled Development of a Novel Wave Energy Converter Including Numerical Analysis and High-Resolution Tank Testing[C]. Proceedings of the IEEE，2013，101(4)：866.