

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.009

海洋温差能发展现状与关键科技问题研究综述

张继生^{1,2}, 唐子豪², 钱方舒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: 针对海洋温差能这一海洋新能源研究热点问题, 总结分析温差能资源评估技术发展和资源分布现状, 梳理温差能发电的循环方式、工质和深海管道等方面的技术变迁, 并介绍当前国内外主要的温差能示范工程。从温差能发电装置的安全稳定、深层冷海水的综合利用、转换效率与多能互补和温差能发展的环境效应等几个方面探讨温差能发展中的关键科技问题, 指出发展温差能的可行性和必要性以及当前面临的问题和挑战。

关键词: 温差能; 资源评估; 示范工程; 循环效率; 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(2019)01-0055-10

A review of recent advances and key technologies in ocean thermal energy conversion

ZHANG Jisheng^{1,2}, TANG Zihao², QIAN Fangshu²

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

Abstract: Ocean thermal energy conversion (OTEC) is a hot research topic in the field of ocean renewable energy. The developments of OTEC resource assessment, resource distribution, and cycle mode as well as the OTEC demonstration project were reviewed and analyzed. Then, the key technologies of OTEC from the stability of power generation platform, the comprehensive utilization of cold water, the efficiency improving, the multi ocean renewable energy complementary and the environment effect of OTEC plant have been discussed. Although the development of OTEC is feasible and necessary, there are still many challenges and difficulties to solve.

Key words: ocean thermal energy conversion (OTEC); resource assessment; demonstration project; cycle efficiency; environment effect; review

根据世界气象组织 2017 年《温室气体公报》, 全球碳排放量在 2016 年达到了近 80 万年来的峰值。如何减少全球的碳排放, 控制全球变暖等气候问题已经成为全人类面临的共同难题。作为全球经济大国, 我国的碳排放形势同样严峻。改善能源结构, 加大新能源在能源消费中的占比迫在眉睫。

温差能作为海洋可再生能源的重要来源之一, 储量仅次于波浪能^[1], 其合理开发对于改善能源结构、控制气候变化和解决环境污染问题具有重要的意义。相比其他海洋能, 温差能的能量更加稳定, 周期波动较小, 尤其是东海黑潮区和我国南海海域, 温差能资源储量丰富, 开发条件优越。随着近年来“海上丝绸之路”的不断发展, 走向深蓝、发展海洋经济已经成为国家经济发展的重要战略。“十三五”期间(2016—2020 年)海洋经济发展规划中, 更是把绿色发展作为海洋经济发展的基本原则之一^[2], 这些都为我国开发利用温差能提供了有利条件。

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0611)

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, 唐子豪, 钱方舒. 海洋温差能发展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), 2019, 47(1): 55-64.

ZHANG Jisheng, TANG Zihao, QIAN Fangshu. A review of recent advances and key technologies in ocean thermal energy conversion [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 55-64.

温差能概念起源于1881年的法国,之后美国、日本等国对温差能发电技术进行了不断的完善和发展。我国从20世纪80年代开始逐步开展温差能的相关研究,也取得了显著进展。本文将从温差能资源评估方法与资源分布现状、温差能发电技术和示范工程以及关键科技问题等方面对温差能发展作一个综述。

1 温差能资源评估方法与资源分布现状

温差能指的是海洋表层与深层海水之间的温差储存的热量,其能量与海洋表层和深层海水之间的温差以及水量成正比^[3]。海水水温随着深度的增加而不断减小,800 m以下水温变化幅度很小,基本维持在4~6℃,而表层海水的温度受季节变化和极端恶劣天气的影响较大^[4],不同纬度的海域水温差异也较大。温差能开发所需的最低温差随着设备不断改造升级也在不断地降低。总的来说,目前公认的适宜开发的温差范围大致为18~20℃,普遍认为当温差低于16℃时,不具备温差能开发条件^[5-6]。对于温差能资源的评估,国内外学者提出了许多不同的评估方法,大致可分为理论计算、数据资料再分析和数值模拟方法,下文将介绍几种典型的评估方法和温差能资源分布现状。

1.1 理论计算评估法

温差能资源评估最直接的方法就是通过实测或估算资料结合理论公式计算得出温差能储量。王传崑^[7-8]对基于太阳辐射热推算温差能资源蕴藏量的方法做了一些改进,通过计算海面的净收热来估算南海温差能资源。假定海面净收热总量即为可利用的海洋热能最大值,则海洋热能总量为

$$E = FQ_r \tag{1}$$

相应的功率为

$$P = E/T = FQ'_r \tag{2}$$

式中: F ——具有足够温差的海洋面积; Q_r ——单位海面面积年净收热量; T ——年周期; Q'_r ——单位时间内单位海面面积的净吸收热量。

由于东海海域海面热收支情况与南海不同,东海海域表面净吸热为负,即向海面放热,因此,采用使上层均匀层温度降低1℃的方法来估算东海的温差能理论储量。

吴文等^[9]采用了热容量法来推算我国海水温差能资源。以南海北部为例,取水深75 m以上、面积 $3.007 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 的海水为浅层暖水,加权温度约为26.1℃。冷水层的选取有2种不同方式:一种是将3℃左右的下均匀层视为冷水层;另一种是从实际工程角度考虑,取800 m以下为冷层,平均温度约为5℃。这种冷水层选取方法在确定表层和深层温差后,采用威克公式^[10]来计算具体的温差能储量:

$$E = \rho V c \Delta t \tag{3}$$

其中

$$V = F'h$$

式中: ρ ——海水密度($1025 \sim 1030 \text{ kg/m}^3$); V ——上层暖水层的体积; c ——海水比热容($4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{℃)}$); Δt ——海水表层和深层温差; F' ——暖水层的面积; h ——暖水层选取的深度。

日本热能技术协会利用当量法对日本近海及其毗邻海域进行了温差能资源的评估^[8]。这一方法将赤道附近海域每 200 km^2 温差为22℃、转换效率取2%时,以及发电功率为 10^6 kW 为基本假设条件,把表深层温差达到15℃以上的时间作为可能发电时间。按式(4)计算年发电功率指数 I_{PY} :

$$I_{PY} = \eta_H M_H + \eta_A (M_L - M_H) \tag{4}$$

式中: η_H 、 M_H ——最高表层水温 t_H 时的发电效率和持续月数; η_A ——在 t_H 和底层水温 t_L 间的平均发电效率; M_L ——表层水温超过 t_L 的持续月数。

将 I_{PY} 乘以假设中的单位面积发电功率(每 200 km^2 发电功率 10^6 kW)得到各地每平方千米的发电功率。

1.2 数据再分析评估法

温差能资源评估,除了理论计算评估法之外,另一种方法就是利用现有的数据资料对温差能进行再分析评估。闫恒乾等^[11]利用SODA数据库和马里兰大学分析系统,得出了西太平洋和我国各海域温差能资源的时空特征。Andrea等^[12]则利用WOA09温盐数据以及GEBCO(墨卡托海洋总体测深图)水深数据等资料,分析了哥伦比亚海域圣安德鲁斯岛附近的温差能储量。国家海洋技术中心白杨等^[13]利用WOA13再分析数据,基于Nihous^[14-15]、Krishna等^[16]提出的评估公式,对我国南海温差能潜在站址进行了分析和对比研究,并引入季节指数来评估温差能发电的稳定性。研究发现,在永兴岛、美济岛、永署岛和渚碧岛4个站址中,渚碧

岛季节指数最低,温差能发电最稳定,而永兴岛冬季受寒潮影响,季节指数高,年周期波动较大。4 个站点中,月最小发电功率超过 8 MW(永兴岛,1 月),最大发电功率达到 19 MW 以上(渚碧岛,6 月),温差能资源储量丰富,发展潜力较高。吴国伟等^[17]还引入海洋表层水温熵的概念,用以评估海洋表层水温在不同时间尺度和空间范围上分布不确定性的变化特征,表层水温熵越小表明海洋表层水温系统的不确定性越小,可预测性越高。

1.3 数值模拟评估法

利用数值模拟方法评估温差能资源正在快速发展并逐渐成为研究热点。James 等^[18]通过 HYCOM 海洋数值模型,模拟了佛罗里达海域的温盐场,得出这一海域温差分布情况,并以洛克希德·马丁公司已有温差能装置为背景对设备各参数提出适当假设,改进了功率计算公式,将其简化为一个与温差成正比的线性方程^[19]:

$$P_N = P_G^{LM} - L_{fixed} - L_{var} = \frac{106.22\Delta T^2}{T_s - 0.25\Delta T + 273.15} - L_{fixed} - L_{var} \approx 13.89\Delta T - 149.71 - L_{fixed} - L_{var} \tag{5}$$

式中: P_N ——净功率; P_G^{LM} ——总功率; L_{fixed} ——温水泵和其他耗能(基本固定); L_{var} ——冷水泵消耗的功率(随提水深度变化而变化)。

Nihous^[14]也利用数值模拟方法在温差能资源评估方面做了不少研究工作。通过建立海洋环流模型,模拟评估了全球及特定海域的温差能资源储量。在他们的计算方法中,总功率主要取决于蒸发器热负载和热力学效率^[14-15],其计算公式见式(6):

$$P_g = \frac{Q_{cw}\rho c \times 3\gamma\epsilon_{tg}\Delta T^2}{16(1 + \gamma)T_{表}} \tag{6}$$

式中: P_g ——总功率; Q_{cw} ——冷水流量; ρ ——海水密度; ΔT ——表层与深层海水之间的温差; $T_{表}$ ——表层海水水温; ϵ_{tg} ——轮机效率,最高取 0.85; γ ——表层暖水流量 Q_{ww} 与 Q_{cw} 的比值。

鉴于在温差能实际工程中,相当一部分能量被用于提取深层海水,以及 γ 取值的变化,Rajagopalan 等^[20]、Jia 等^[21]提出的净功率计算公式如式(7)所示。同时,基于 MITgcm 海洋环流模型,用固定强度的流体源和汇来模拟大规模温差能设备的运营过程。在这一模型中,将 γ 值固定为 1.5,并用一个具有速度维度的深海入水口体积流量 w_{cw} 来表示 Q_{cw} ,对净功率计算公式^[20-21]进行了调整,见式(8)。

$$P_{net} = \frac{Q_{cw}\rho c\epsilon_{tg}}{8T} \left[\frac{3\gamma}{2(1 + \gamma)}\Delta T^2 - 0.18\Delta T_{design}^2 - 0.12\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{2.75}\Delta T_{design}^2 \right] \tag{7}$$

$$P_{net} = w_{cw} \frac{\rho c\epsilon_{tg}\gamma}{1 + \gamma} \left(\frac{3\Delta T^2}{16T_{表}} - \frac{3}{40} \right) = w_{cw}\rho c\epsilon_{tg} \left(\frac{9\Delta T^2}{80T_{表}} - \frac{9}{200} \right) \tag{8}$$

温差能资源评估方法经历了长足的发展,总的来说,仅利用理论公式计算的方法评估结果较为粗糙,只能从宏观上描述某一海域的资源储量,无法为具体工程提供指导。而通过数据资料再分析的评估方法较为高效,应用也较为广泛,但这种方法的缺点在于仅能分析当前温差能资源储量,缺乏可预测性。值得一提的是,数值模拟方法既能较为准确地反映当前资源状况,又能预测大规模温差能工程运营可能带来的影响,其结果更加真实准确,指导作用强。因此,发展更加精确高效的数值模拟方法必将成为未来温差能资源评估的主流。

1.4 资源分布现状

全球范围内来说,温差能储量十分丰富,但主要集中在南北回归线之间且最大水深达到 1 000 m 的热带海域,而且温差能储量存在明显的季节性变化,夏季储量相较于冬季更为丰富。据 Hans 等^[1]的估算,全球年均温差能储量约相当于 1 000 TW·h。而 Rajagopalan 等^[20]、Jia 等^[21]通过数值模拟手段对稳定状态下全球温差能理论发电功率做了一系列研究,2013 年研究结果表明全球温差能储量相当于 7 TW,最新研究进一步考虑了大气反馈效应对海洋环流的影响,结果显示全球温差能最大值相当于 8~10.2 TW,其中海岸线 100 km 以内的温差能储量相当于 7.2~9.3 TW。日本热能技术中心利用式(4)计算的日本近海及其毗邻海域温差能平均功率为 75.36×10^8 kW,年发电量为 66×10^{12} kW·h。

利用 SODA 的 2 月海洋数据资料得出全球海洋温度分布图(图 1),可以看出,在 0°N~30°N 范围内海洋表面平均温度在 25~30℃之间,而该范围内 1 000 m 深度的海水温度基本维持在 5~7.5℃(图 2)。这说明即便是在海洋水温相对较低的冬季,全球热带及部分亚热带海域温差也能维持在 20℃左右,这些区域都拥有丰富的温差能资源。

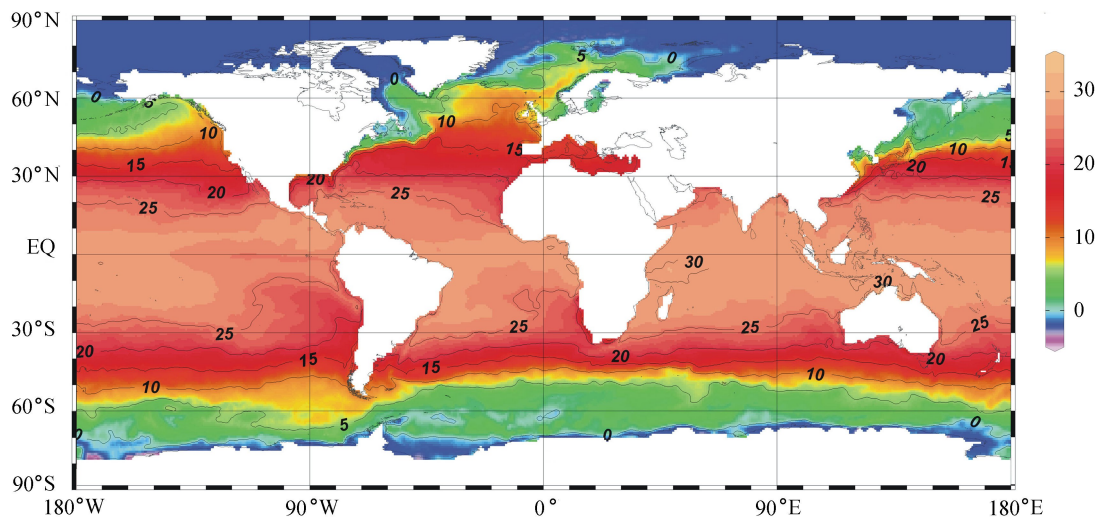


图1 全球海洋表面温度分布(单位:℃)

Fig.1 Global temperature distribution at the sea surface (units:℃)

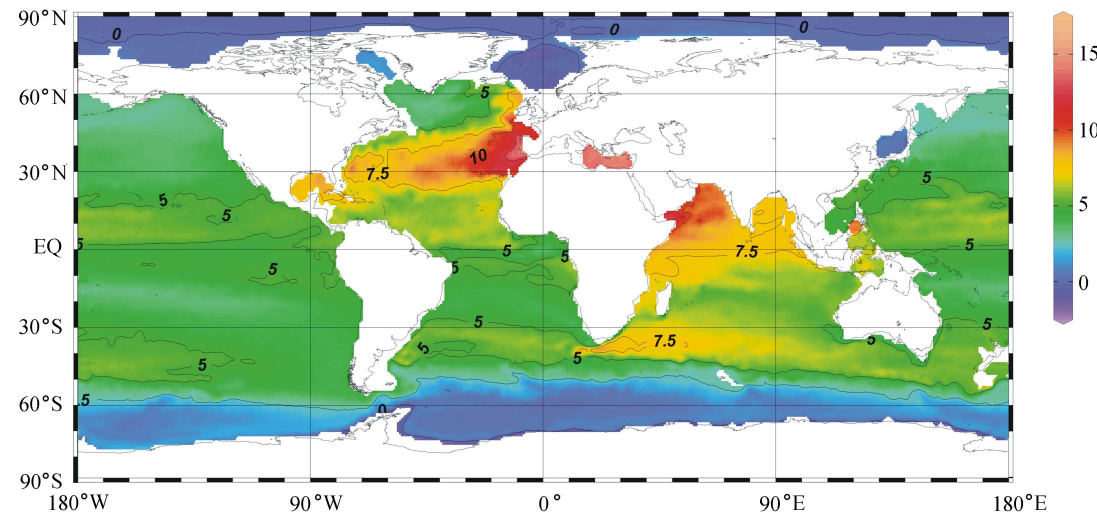


图2 全球海洋1000 m深度温度分布(单位:℃)

Fig.2 Global temperature distribution at 1000 m deep seawater (units:℃)

以美国佛罗里达海域为例,该海域温差能资源丰富,能容纳约10 294台100 MW的温差能发电机组。也就是说,该海域1%的冷水资源理论上可产生约12 GW净功率,这相当于美国2011年发电总功率的2.6%(美国2011年电力总功率约为461 GW)^[14,22-24]。哥伦比亚圣安德鲁斯岛附近海域也是温差能开采的理想区域,这一海域水深1 000 m(表层与深层海水温差22℃)处距离海岸线不到3 km,在该岛屿西南角外海水深度540 m左右处,表层与深层海水温差即可达到20℃,这大幅度降低了冷水管道的成本,有效提高温差能设备的净输出效率^[12]。

我国海域广袤,各海域温差能资源分布情况存在较大差异。渤海海域纬度较高,表层吸收的热量较少,且水深较浅(平均水深仅18 m),表层和深层温差不大,基本不存在温差能开发价值。黄海海域平均水深44 m,温差较小,虽然在夏秋季节存在黄海冷水团,但现阶段温差能转换效率较低,这种不可连续的资源开采经济效益差,可行性较低^[8]。

东海受黑潮、暖流和黄海冷水团的影响,温度分布较复杂,陆架区水深较浅,温差能资源随季节变化波动较大,开发难度较大。按照王传崑^[7]的评估方法,我国东海温差能蕴藏量约为每年 72.11×10^{18} J(约相当于 2×10^{13} kW·h),但是吴文等^[9]研究表明东海中国海区温差能蕴藏量约为每年 22.5×10^{19} J(约相当于 6.25×10^{13} kW·h),两者存在一定差异。

南海海域位于北回归线以南,表层水体吸收热量较多,温差年际变化较小,平均水深1 212 m,水深足够

且海底地形条件合适,被认为是温差能开发的理想场所^[25-26]。闫恒乾等^[11]通过历年数据的对比,发现我国温差能资源主要集中在南海海域,且温差能的能流密度也在不断升高。基于王传崑^[7]评估方法得出的南海温差能蕴藏量约 $18.89 \times 10^{20} \text{J}$ (约相当于 $5.25 \times 10^{14} \text{kW} \cdot \text{h}$),中国海温差能总计 $19.61 \times 10^{20} \text{J}$,其中南海海域温差能资源占我国蕴藏总量的 96% 以上。基于吴文等^[9]方法评估得出的南海温差能蕴藏量约 $11.88 \times 10^{21} \text{J}$ (约相当于 $3.3 \times 10^{15} \text{kW} \cdot \text{h}$),中国海温差能总计 $1.22 \sim 1.33 \times 10^{22} \text{J}$,其中南海海域温差能资源占 97% 以上。

根据国家海洋局实施的“我国近海海洋综合调查与评价”专项(“908”专项)^[27-28],我国南海近海表层与深层温差 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上水体的温差能理论装机容量达到 $36\,713 \times 10^4 \text{kW}$,理论年发电量为 $32\,161 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,技术可开发年发电量达到 $2\,251 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,相当于 2.5 个三峡电站的年发电量。

2 温差能发电技术和示范工程

自 1881 年温差能发电的概念提出以来,温差能发电技术便不断地发展和完善,国内外针对海洋温差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 温差能发电系统循环方式

温差能发电系统的循环方式是决定温差能发电效率的关键因素,主要分为开式、闭式和混合式循环共 3 种方式。对于海洋温差能发电而言,单工质朗肯循环是最基本的闭式循环方式,其装置结构简单,在减小压降方面具有较大优势,但其循环热效率较低,仅 3.00% 左右^[29],系统综合发电效率仅约 1.00%。有机朗肯循环在发展中还衍生了许多不同的类型,如预热式有机朗肯循环、回热式有机朗肯循环、喷射式有机朗肯循环等。其中,喷射式循环通过加装的喷射装置,由引射膨胀机出口工质,从而降低出口背压,提升输出功率^[30]。卡琳娜循环^[31-32]是一种中低温余热闭式发电循环,相较于朗肯循环,卡琳娜循环增加了一个分馏子系统,使氨水混合工质能变温蒸发,减小了系统内部的热量损失,在低温余热的利用上效率更高,热效率可达 4.50% 以上。在此基础上,卡琳娜循环发展出一系列不同循环方式^[33],其中 KCS-11 循环和 KCS-34 循环适合低温热源的温差循环系统,而 KCS-34g 循环则适用于小型温差发电装置,海洋温差能一般使用 KCS-34 循环^[34]。上原循环^[35]主要包括做功循环和分离/吸收循环,其基本原理与卡琳娜循环并无差异,但循环的热效率相比于卡琳娜循环又有所提高,可达 4.97%。上原循环采用贫氨回热和中间回热技术,减小了循环过程中的热量损失,提高了循环热效率。国海循环^[36-38]是国家海洋局第一海洋研究所提出的一种新的循环方式,采用贫氨溶液回热循环和氨气回热循环,其特点在于巧妙地设置了 2 个回热器,使基本溶液更多地吸收贫氨溶液的热量,增加氨气对透平的做功,将温差能转换的热效率提高到 5.10%,成为当前效率最高的循环方式。

2.2 温差能发电系统工质和换热器

温差能发电系统工质的选择也是影响系统循环效率的关键因素之一,寻求更加安全高效的工质对海洋温差能的发展意义不言而喻。王辉涛等^[39]采用 PR 状态方程计算了 R218、R600 等 11 种低沸点有机流体工质闭式温差能循环中的热力性能,结果表明 R600(正丁烷)具有较高的热效率,且凝结压力与蒸发压力均适合海洋温差能发电循环系统。李大树等^[40]通过建立海洋温差发电系统仿真模型,分析了 R717、R134a 和 R600 这 3 种工质的性能参数和蒸发压力的关系。研究发现,R717(氨)工质蒸发压力操作范围较大,且其热效率高,单位换热面积发电量在合适的范围之内,是当前较理想的海洋温差能发电工质。但是,氨工质作为目前已知的较为高效的循环工质,存在一定的毒性,寻求一种高效易得且绿色环保的工质是未来温差能循环工质研究的重点。卡琳娜循环中氨水混合工质的配比对循环效率有着显著的影响,刘煜森等^[32]研究发现,当氨水质量分数为 91% 时循环效率最高。除此之外,已有研究表明,混合工质可以有效减少可用能的损失,提高系统效率,混合工质的配比优化也是未来发展的一个重点。换热器同样是影响系统循环效率的关键因素之一。影响换热器性能的主要是其结构型式和表面材料,其中,板式换热器因其体积小、换热效率高而被广泛应用。日本佐贺大学对板式换热器进行了大量试验和数值模拟,研究发现具有表面凹凸的板式换热器,可以更好地促进氨水混合介质的传热。此外,该校研究者利用环境友好型的臭氧进行换热器防污试验研究,极大程度地减小了换热器的污染问题,提高其使用效率^[41]。

2.3 温差能发电系统深海管道技术

长距离深海管道的铺设是海洋温差能发电中的一个技术难点和主要成本来源,管道的材料选取、保温性与可靠性在很大程度上决定了温差能发电的技术可行性和经济性。施伟等^[42]研究了深海冷水管道的提水过

程中海水温升特性,发现新型高密度聚乙烯(HDPE)管道的保温性能明显好于钢制管道,且对于同一种材质,管径越大、入流速度越快则保温性能越好。美国马凯公司在已经建成的夏威夷温差能示范工程中,便采用新型聚乙烯管道作为冷水空调系统的深海冷水管,并联合洛克希德·马丁公司设计研发了一种新型的玻璃纤维管道^[43]。相比于 HDPE 材料,玻璃纤维的强度更高、耐久性更好。

2.4 温差能发电技术的其他研究

国家海洋技术中心针对海洋观测平台的电能供给难题,研制了 300 W 小型温差能发电原理试验样机。该系统能够在低温 12 ℃、高温 25 ℃ 环境下完成热能转换。2015 年在千岛湖进行了湖试,于 2016 年 8 月在北黄海冷水团进行了温差能发电试验,试验过程中最大发电功率达到 302 W。国家海洋局第一海洋研究所研发了采用混合工质混合式循环方式的温差能发电装置,该装置功率不低于 5 kW,在试验运行工况下成功发电 720 h。通过对该系统的数值模拟研究,得到系统运行各节点参数,并在青岛市研制建设了 10 kW 海洋温差能发电系统。同时,针对该系统设计了小型海洋温差发电工质透平,解决了透平中密封、效率低等关键技术问题,该试验系统目前已完成系统的调试与运行。除此之外,刘奕晴^[44]搭建了海洋温差能发电试验装置,分析了混合式温差能发电系统的发电功率与流量、冷海水温度、冷凝温度及蒸发温度的关系。赵伟阁^[45]研究改进了试验用 200 W 氨饱和蒸汽透平的结构,分析透平叶轮叶片类型、结构、主要参数及气体在叶栅中的流动,建立了样机虚拟仿真模型。

2.5 温差能示范工程

随着海洋温差能发电技术的不断发展和完善,世界各国陆续涌现了大量的海洋温差能示范工程和拟建项目,其中美国和日本起到了主导作用。美国从 20 世纪 70 年代起就逐渐开始进行温差能发电的理论和技术研究,1979 年在夏威夷建成了第一座小型温差能发电设备(Mini-OTEC)^[46]。夏威夷自然能源实验室与马凯公司也建立了一系列海洋温差能发电示范工程^[43,47],2014 年在夏威夷正式安装了 100 kW 温差能发电机组,并于 1 年后成功并入美国国家电网,成为世界上在运营的最大海洋温差能电厂。在该示范工程中,冷海水可通过直径 40 inch(101.6 cm)冷水管从 620 m 深处抽取或者由直径 55 inch(139.7 cm)冷水管从 914 m 深处抽取,可为温差能发电装置的换热设备提供 26 000 gal/min(98 420.7 L/min)冷海水,以及相应流量的表层温水^[43],该项目可满足夏威夷 120 个家庭每年的电力需求。据悉,该示范工程规划总功率将达到 10 MW,届时将源源不断地提供更多绿色、环保的电能。该工程正式并网发电具有里程碑式的意义,因为这不仅标志着海洋温差能发电切实可行,更为以后大型化综合化开发海洋温差能资源打下了坚实基础。马凯公司规划在未来与洛克希德·马丁公司合作,为夏威夷、关岛等远洋岛屿建立 100 MW 大型海洋温差能电厂,以缓解当地的能源紧张状况^[48]。

日本从 20 世纪 80 年代开始也进行了大量的温差能电站试验研究,例如著名的瑙鲁 100 kW 试验电站,冲绳德之岛 50 kW 试验电站^[49-50],以及佐贺大学在 1985 建立的伊万里 75 kW 陆基试验电站和 2002 年建立的伊万里附属设施试验据点等^[50]。2013 年日本冲绳久米岛也正式开始了温差能电站的示范工程建设,项目区域表层水温 24 ℃、深层水温 10.7 ℃,该电站已经成功进行了试发电^[51]。目前,该示范工程主要用于科研试验,其研究重点主要集中在温差能发电和深层海水的综合利用。“久米岛模型”将大规模温差能发电设备和海水利用集成在一个系统中,提高了温差能示范电站的整体经济性。例如,用温差能发电设备使用过后的冷水来调节表层暖水水温,用于牡蛎的养殖(牡蛎在水温 17~20 ℃ 时产卵繁殖),从而大幅度提高了深层冷水的使用效率。

我国的温差能示范工程正处于起步阶段,在海洋可再生能源专项“南海海洋能开发利用资源评估与示范电站总体设计”中规划开展南海海洋能示范电站设计工作,结合当地海岛的温差能资源条件和海洋环境条件,完成温差能示范电站的总体设计工作,预计在“十三五”期间(2016—2020 年)建设我国第一个温差能示范工程,突破 50 kW 温差能发电及综合利用关键技术,并掌握高效热力循环、低温工质透平、深层冷海水管道敷设,以及深层冷海水热法淡化与冷站、集成与控制等关键技术^[52]。

3 温差能发展中的关键科技问题

3.1 发电装置的安全稳定

温差能发电装置主要分为岸基式和平台式 2 种,对于海上平台式发电装置,通常面临着复杂多变的海况

的考验。南海地区受到台风侵袭较为严重,由此导致的风暴潮灾害对这一海域的平台式发电装置的结构强度提出了较高的要求。得益于人们对深海油气资源的巨大需求,海洋石油平台的结构稳定和锚泊定位技术发展迅速,这些技术储备可以为海洋温差能平台的开发提供大量的支持。在海洋温差能平台的运营过程中,对装置稳定性及可靠性要求最大的应该是深海冷水管。这条长度达到 1 km 的立管从海面一直伸向深海冷水区,在海流作用下,管道极易发生涡激振动,而且海流作用的水深范围广、时间长,管道作业的水深越大,涡激振动效应也越严重,从而导致管道结构的疲劳破坏^[53],会大幅度增加海洋温差能平台的维护成本。因此,如何采取有效措施抑制涡激振动效应已成为海洋温差能平台未来发展的重点。此外,研制新型无毒无污染的防腐蚀材料与防生物附着技术也是保证发电装置安全稳定的关键。

3.2 深层冷海水的综合利用

海洋温差能发电过程中的能耗绝大部分用于深层冷海水的提取,如何合理有效地管控和利用这些与表层海水在温度、盐度及矿物质浓度等方面均相差巨大的深海海水,已经成为海洋温差能发展中的一个关键问题。2018 年中央一号文件将“统筹海洋渔业资源开发,科学布局近远海养殖和远洋渔业,建设现代化海洋牧场”作为质量兴农的国家战略。如何科学设计、规划海洋牧场已经成为海洋产业的热点。而海洋温差能发电需要抽取深层的冷海水,这些冷海水富含大量的氮、磷、硅等营养成分,对于海洋藻类等的生长十分有利。因此,可以考虑海洋温差能和海洋牧场共同开发,在增加海洋渔业资源产量的同时,提高深层冷水的利用率。我国首个智能渔场“深蓝 1 号”已于 2018 年 5 月在山东日照成功下水,如果这一设备能与温差能发电相结合,利用半潜式智能渔场作为温差能发电设备的海上平台,产出的电能和淡水可以供给平台上工作人员的生产和生活,抽取的富含营养的深层冷水处理后又可以用于渔场的渔业养殖。深层冷海水还可为海岛居民集中提供冷水空调,这使得温差能发电系统的综合成本低于在远海岛礁上使用化石燃料的成本。而且,这一技术在世界上已经比较成熟,拥有许多成功的案例,例如上文所述的马凯公司在夏威夷自然能源实验室建立的 100 kW 示范工程就包含冷水空调系统^[43,54]。在未来的温差能发展中,可以建设成规模的岸基式温差能发电厂,除了供给电能外,还能产出大量的淡水供应岛礁的生产与生活。与此同时,还可建设相应的冷水空调系统,为岛屿带来绿色清洁的清凉体验。

3.3 转换效率与多能互补

随着循环形式、透平设计等不断改进,温差能发电装置效率得到了一定提升,但是目前其系统转换效率仅为 5% ~ 10%。相比之下,常规火电效率超过 40%,大型水电机组效率更是高达 90%。低效、低装机容量和相对较高的成本使得海洋温差能在近海浅水地区缺乏与传统的火电和水电竞争的能力,这也是海洋新能源发展的瓶颈所在。但是,海洋温差能在深海远洋工程中有着较大发展潜力。一方面,我国目前海洋岛屿供电模式以岛外引电为主、自主供电为辅^[55],而深海岛礁、海上平台孤悬海外,传统能源鞭长莫及;另一方面,远海发电装置产出的电能输送回大陆成本高、难度大,可行性较低。因此,在深海远洋工程中“就地取能、海能海用”是未来海洋温差能发展的主要方向。

温差能发电系统的耗能模块主要指温水泵和冷水泵。可以通过结合小型太阳能,以及风能、波浪能、海流能等其他形式的海洋能发电装置,成为温、冷海水泵供电的形式,弥补系统耗能模块的能量损失^[56]。王冠杰等^[57]设计了一套多能互补的温差能综合发电装置,在原有混合式循环温差能发电装置的基础上,增加了一个表层温水加热系统和一套额外的小型供能系统,通过风光互补发电装置,为温水泵和温水加热装置供能。深海中冷水管道的铺设成本和技术难度随着深度的增加成几何倍数增长,而该装置的主要优势在于保证足够温差的同时可大幅度减小冷水的提取深度,在一定程度上降低了成本和技术难度,该研究对未来海洋温差能的发展具有很好的参考价值。通过多能互补的方式取长补短,可加快温差能等海洋新能源示范工程的发展进程,提高温差能发电系统的可行性。

在深海工程和远洋岛礁上,淡水资源是比电能更紧缺、更重要的特殊资源,而这恰好是海洋温差能发电的一个独特优势。据美国太平洋高技术国际研究中心^[48] (PICHTR) 预计,一个 1.5 MW 净功率的温差能发电系统可日产淡水约 3 000 m³,用于供给人口密度不高的远海岛礁和海洋平台绰绰有余。此外,对于深海远洋工程,可以建设集成漂浮式温差能发电系统,漂浮式海上风电机组、太阳能发电系统和海洋渔业养殖的海上平台,充分发挥深海远洋水深温差条件优越、风光资源充沛的特点。

3.4 温差能利用的环境效应

虽然海洋温差能资源是一种无污染、无碳排放的绿色清洁能源,但是其带来的环境效应仍需引起人们足够的重视。其一,发电过程中将低温富营养的深层冷海水引入了日照丰富的温暖表层海水中,如果这部分海水没有得到合理的管控和利用,会直接改变浅层水体溶解的气体 and 矿物质浓度,造成海洋浮游生物的大量生长并引起藻华,从而破坏海洋浅层生态平衡。其二,大型温差能工厂将利用后的废水排放到某一深度海水中,如此大规模的海水转移,很可能会改变大洋局部的垂直温盐结构^[58],这对于排水口附近一定范围内的生态系统也会造成不可逆转的影响,长此以往可能引起难以评估的环境效应。其三,大功率水泵取水口水流速快,可能会导致大型海洋生物撞击取水装置,对海洋生物的安全构成威胁;而一些小型海洋生物,如幼鱼、浮游生物等,可能会被吸入热交换系统,温盐密度和压力的急剧变化对这些生物而言无疑是灭顶之灾。

当然,上述环境效应带来的影响可采取相应措施来应对。例如,通过合理管控并结合海水养殖,以此创造温差能利用系统排水的附带效应。对于可能造成的海水温盐结构变化,可以采用海洋平台进行流动式作业,减小对某一特定水域水体的影响^[59];也可考虑用其调节局部海水温度,例如全球变暖带来的海水升温使举世闻名的大堡礁珊瑚礁群出现了大规模的白化。在这一背景下,以温差能排放的低温冷海水来调节浅层水温、缓解大堡礁的升温困境,具有一定的研究价值。由此可见,在实际工程中,应该针对温差能可能引起的环境影响做好充分评估和预防,尽可能减少温差能负面环境效应,不走“先破坏,再治理”的老路。

4 结 语

海洋温差能储量巨大且绿色环保,并能在一定程度上反哺海洋养殖,具有很大的发展潜力。高精度数值模拟方法是未来温差能工程运营中资源评估、可行性分析和环境影响评估的主要手段和发展趋势。提高温差能发电系统的效率和净功率,加强对温差能发电装置安全性和冷水后处理的研究,提高装置使用寿命和冷水的利用率,以此提升温差能发电的综合经济效益是未来温差能发展的重点。在今后发展中,应该贯彻海能海用、就地取能、多能互补的重要思想,将温差能和其他海洋能互补,借鉴并结合其他海洋平台的发展经验,使其早日在深海远洋中为人类创造价值。本文总结分析海洋温差能资源评估方法和资源分布现状、探讨了温差能发电技术的发展变迁以及温差能发电的关键科技问题。海洋温差能发电现阶段仍面临着许多问题和挑战,但对于我国而言,其长远的经济效益、环保效益和政治军事价值都难以估量,加大对温差能的研究和建设势在必行。

参考文献:

- [1] HANS C S, WEINSTEIN A. Ocean energy: position paper for PCC[C]//Anon. Key Note Paper for the EPCC Scoping Conference on Renewable Energy. Lübeck, Germany: Committee of Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008: 811-818.
- [2] 中华人民共和国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.
- [3] 肖钢. 海洋能: 日月与大海的结晶[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2013.
- [4] 周雨. 寒潮天气对区域海流能及温差能影响的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [5] 薛桂芳, 武文, 刘洪滨, 等. 浅谈海洋温差能及其可持续利用[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2008, 24(2): 15-19. (XUE Guifang, WU Wen, LIU Hongbin, et. al. Ocean thermal energy and its sustainable utilization[J]. Journal of Ocean University of China(Social Sciences), 2008, 24(2): 15-19. (in Chinese))
- [6] 吴春旭, 吴必军, 叶寅. 海洋热能利用进展[J]. 新能源进展, 2014, 2(6): 454-461. (WU Chunxu, WU Bijun, YE Yin. A review of ocean thermal energy utilization[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(6): 454-461. (in Chinese))
- [7] 王传崑. 我国海洋能资源的初步分析[J]. 海洋工程, 1984, 2(6): 58-67. (WANG Chuankun. Primary analysis of ocean energy sources of China[J]. China Ocean Engineering, 1984, 2(6): 58-67. (in Chinese))
- [8] 王传崑. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [9] 吴文, 蒋文浩. 我国海水温差能资源蕴藏量和可开发量估算[J]. 海洋工程, 1988, 6(1): 79-88. (WU Wen, JIANG Wenhao. The estimation of the reservoir capacity and the exploitable quantity of China oceanic thermal energy[J]. China Ocean Engineering, 1988, 6(1): 79-88. (in Chinese))
- [10] WICK G L, SCHMITT W R. Prospects for renewable energy from the sea[J]. Marine Technology Society Journal, 1977, 11(5/

- 6): 16-20.
- [11] 闫恒乾, 王辉赞, 周树道, 等. 基于 SODA 资料的太平洋及我国周边海域温差能资源时空特征分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 128-139. (YAN Hengqian, WANG Huizan, ZHOU Shudao, et al. Analysis on the temporal and spatial characteristics of the thermal energy in the Pacific Ocean and the sea area surrounding China based on SODA data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(11): 128-139. (in Chinese))
- [12] ANDREA D M, RAÚL A, MONTOYA S, et al. Ocean thermal energy resources in Colombia[J]. Renewable Energy, 2014, 66(1): 759-769.
- [13] 白杨, 张松, 汪小勇, 等. 三沙市温差能电站潜在站址选划分析[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 230-234. (BAI Yang, ZHANG Song, WANG Xiaoyong, et al. An analysis on the potential site of ocean thermal energy conversion(OTEC) in Sansha [J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(2): 230-234. (in Chinese))
- [14] NIHOUS G C. An order-of-magnitude estimate of ocean thermal energy conversion resources[J]. Journal of Energy Resources Technology and Transactions of the Asme, 2005, 127(4): 328-333.
- [15] NIHOUS G C. A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources[J]. Journal of Energy Resource Technology, 2007, 129(1): 10-17.
- [16] KRISHNA K R, NIHOUS G C. Estimates of global ocean thermal energy conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model[J]. Renewable Energy, 2013, 50(13): 532-540.
- [17] 吴国伟, 白杨, 武贺, 等. 基于 CORA 数据的南海海面温度场变化特征分析[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(4): 37-42. (WU Guowei, BAI Yang, WU He, et al. CORA data-based analysis of sea-surface temperature field variation in the South China Sea[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(4): 37-42. (in Chinese))
- [18] JAMES H V, LYNN T R, LOUIS L. An assessment of Florida's ocean thermal energy conversion (OTEC) resource[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75(17): 683-691.
- [19] JOHN N, LAURA M, EUGENE J, et al. Modeling global ocean thermal energy resources [C]//Anon. Ocean'11 IEEE. Santander, Spain: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [20] RAJAGOPALAN K, NIHOUS G C. An assessment of global ocean thermal energy conversion resources with a high-resolution ocean general circulation model[J]. Journal of Energy Resource Technology, 2013, 135(4): 2210-2221..
- [21] JIA Y L, NIHOUS G C, RAJAGOPALAN K. An evaluation of the large-scale implementation of ocean thermal energy conversion (OTEC) using an ocean circulation model with low-complexity atmospheric feedback effects[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(12): 1-28.
- [22] CHRISTOPHER S M, MOLLY O B, RIGOBERTO F G. Florida Current transport variability: an analysis of annual and longer-period signals[J]. Deep-Sea Research I, 2010, 57(4): 835-847.
- [23] ERIC P C, HARLEY E H, OLE M S, et al. The HYCOM (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 65(6): 60-83.
- [24] LYNN T R, LOUIS L. Global distribution of ocean thermal energy conversion(OTEC) resources and applicability in U. S. waters near Florida[D]. Florida: Florida Atlantic University, 2012.
- [25] 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))
- [26] 施伟勇, 王传崑, 沈家法. 中国的海洋能资源及其开发前景展望[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 913-923. (SHI Weiyong, WANG Chuankun, SHEN Jiafa. Utilization and prospect of ocean energy resource in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(6): 913-923. (in Chinese))
- [27] 吴亚楠, 吴国伟, 武贺, 等. 海岛海洋能应用需求和发展建议探讨[J]. 海洋开发与管理, 2017, 9(1): 39-44. (WU Yanan, WU Guowei, WU He, et al. Islands marine renewable energy application requirement and discussion on developing proposal[J]. Ocean Development and Management, 2017, 9(1): 39-44. (in Chinese))
- [28] 夏小明. 海南省海洋资源环境状况[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [29] 岳娟, 刘伟民, 张理, 等. 单工质朗肯循环海洋温差能发电系统优化研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 31-38. (YUE Juan, LIU Weimin, ZHANG Li, et al. Study on the optimization of Rankine cycle using ammonia working fluid for ocean thermal energy conversion[J]. Ocean Technology, 2014, 33(4): 31-38. (in Chinese))
- [30] 陈旭立. 船舶余热喷射式有机朗肯循环系统特性分析及设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [31] KALINA I A. Generation of energy: United States of America, US 4489563[P]. 1984-11-25.
- [32] 刘煜森, 张华, 赵巍. 卡琳娜海洋温差能发电循环性能研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 105-110. (LIU Yusen, ZHANG Hua, ZHAO Wei. Study on the performance of Kalina energy conversion cycle[J]. Journal of Ocean Technology,

2017, 36(2): 105-110. (in Chinese))

- [33] ZHANG Xinin, HE Maogang, ZHANG Ying. A review of research on the Kalina cycle[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 5309-5318.
- [34] 岳秀艳, 韩吉田, 于泽庭, 等. Kalina 循环系统 KCS11 的热力学研究[J]. 节能, 2014, 4(8): 23-27. (YUE Xiuyan, HAN Jitian, YU Zeting, et al. Thermodynamic research of Kalina cycle system KCS11[J]. Energy Conservation, 2014, 4(8): 23-27. (in Chinese))
- [35] UEHARA H, IKEGAMI T, NISHIDA Y. Performance analysis of OTEC system using a cycle with absorption and extraction processes[J]. Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, 1998, 64: 2750-2755.
- [36] 刘伟民, 陈风云, 王义强, 等. 海洋温差能闭式循环进展及新型循环系统研究[C]//中国可再生能源学会. 中国可再生能源学会学术年会论文集. 北京: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会, 2011: 41-44.
- [37] 陈风云. 海洋温差能发电装置热力性能与综合利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [38] LIU Weimin, CHEN Fengyun, WANG Yiqiang, et al. Progress of closed-cycle OTEC and study of a new cycle[J]. Advanced Material Research, 2012, 354/355(1): 275-278.
- [39] 王辉涛, 王华. 海洋温差发电有机朗肯循环工质选择[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 119-123. (WANG Huitao, WANG Hua. Selection of working for ocean thermal energy conversion power generation organic Rankine cycle[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 119-123. (in Chinese))
- [40] 李大树, 张理. 海洋温差发电系统蒸发压力及工质优选分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 1101-1106. (LI Dashu, ZHANG Li. Numerical analysis on evaporating pressure and working fluids of ocean thermal energy conversion[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(7): 1101-1106. (in Chinese))
- [41] 池上康之. 板式换热器海洋温差发电与海水淡化研究[EB/OL]. [2018-03-12]. http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/research/ioes_present_study/otec_present_study_1.
- [42] 施伟, 刘伟民, 刘蕾, 等. 海洋温差电站垂直冷海水管内海水温升特性数值分析[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 93-96. (SHI Wei, LIU Weiming, LIU Lei, et al. Numerical analysis on the temperature rise characteristics of seawater in vertical cold-water pipe in OTEC plant[J]. Ocean Technology, 2016, 35(4): 93-96. (in Chinese))
- [43] HARTMAN D J. Makai connects world's largest ocean thermal plant to U. S. grid[EB/OL]. [2015-08-21] <http://www.makai.com/makai-news>.
- [44] 刘奕晴. 混合式海洋温差能利用系统的理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [45] 赵伟阁. 试验用 200W 氨饱和蒸汽透平的研究与开发[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [46] ROBERT L W. The mini-OTEC test[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1979, 26(3): 548-552.
- [47] 岳娟, 于汀, 李大树, 等. 国内外海洋温差能发电技术最新进展及发展建议[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 82-87. (YUE Juan, YU Ting, LI Dashu, et al. Study on the up-to-date progress and suggestions for ocean thermal energy conversion technologies[J]. Ocean Technology, 2017, 36(4): 82-87. (in Chinese))
- [48] TAKAHASHI P K. Project blue revolution[J]. Journal of Energy engineering, 1996, 122(3): 114-124.
- [49] MITSUI T, ITO F, SEYA Y, et al. Outline of the 100 kW OTEC pilot plant in the Republic of Nauru[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1983, 102(9): 3167-3171
- [50] 于华明. 海洋可再生能源发展现状与展望[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2012.
- [51] TOKIKO H. Okinawa prefecture post-OTEC seawater utilization demonstration project [EB/OL]. [20170312]. <http://otecokinawa.com/en/Project/PostOTECSeawater.html>.
- [52] 国家海洋局. 海洋可再生能源发展“十三五”规划报告[R]. 北京: 国家海洋局, 2016.
- [53] 宋吉宁. 立管涡激振动的实验研究与离散涡法数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [54] 刘全根. 世界海洋能开发利用状况及发展趋势[J]. 能源工程, 1999, 2(3): 5-8. (LIU Quangen. Status of utilization and trends of the world's oceanic energy development[J]. Energy Engineering, 1999, 2(3): 5-8. (in Chinese))
- [55] 国家海洋局. 2016 年海岛统计调查公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2017.
- [56] 王祺, 汪东, 陈建秋. 海洋温差能发电的一种新设想[J]. 节能与环保, 2003(5): 33-35. (WANG Qi, WANG Dong, CHEN Jianqiu. A new design of ocean thermal energy[J]. Energy Conservation and Environment Protection, 2003(5): 33-35. (in Chinese))
- [57] 王冠杰, 朱永强, 王欣. 集成多种能源的混合式海洋温差能发电系统研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2298-2302. (WANG Guanjie, ZHU Yongqiang, WANG Xin. Hybrid ocean energy temperature difference power generation system with multiple energy sources[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2298-2302. (in Chinese))
- [58] ABBASI S A, ABBASI N. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2000, 65(4): 121-144.
- [59] 董昌明. 绿色海洋能源[M]. 北京: 科学出版社, 2016.