

一种高效海洋温差能发电循环的性能分析

吴浩宇, 彭景平, 葛云征, 刘 蕾, 陈风云, 刘伟民 *

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 海洋温差能是一种环境友好型、可持续利用的清洁能源,但是较低的海温发电系统效率阻碍了海洋温差能发电的商业化应用。提出一种新式循环,采用氨水混合工质,以及贫氨溶液回热和中间抽汽回热方式,实现对贫氨溶液及乏汽的热量二次回收利用。基于能量守恒方程和热力学定律,通过对循环中各设备部分建模分析,构建了新循环的热力模型,并与海洋温差能发电常用循环——朗肯循环进行性能对比分析,结果表明,新循环的热效率与净输出功相比朗肯循环均有显著提高,循环热效率最高可达 4.565%,相较朗肯循环提高了 25.9%。15 kW 等级海洋温差能发电系统中,新循环的净输出功为 7.038 kW,高于朗肯循环中的 5.343 kW。新循环模型的建立及由此得到的各部分性能分析结果,可为海洋温差能商业化开发提供基础数据理论支撑。

关键词: 海洋温差能发电;朗肯循环;循环热效率;净输出功

中图分类号: P743

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0513-09

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.013

引用格式: WU H Y, PENG J P, GE Y Z, et al. Study on performance analysis of the high-efficiency OTEC cycle [J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(3): 513-521. 吴浩宇, 彭景平, 葛云征, 等. 一种高效海洋温差能发电循环的性能分析[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(3): 513-521.

随着社会和经济的飞速发展,世界各国都面临能源需求快速增长的问题,而化石燃料作为目前世界上主要使用的燃料资源,储量越来越少,且在利用过程中易对环境造成污染。开发利用新能源和可再生能源是减少对石油等化石燃料的依赖,解决能源短缺问题的最有效途径之一^[1]。发展可再生能源对调整我国能源结构、缓解能源相关环境污染,实现能源可持续利用和经济社会可持续发展也具有重要作用。海洋可再生能源(简称“海洋能”)是可再生能源的重要组成部分,其资源储量巨大,对环境友好,所以得到越来越多的关注^[2-3]。

海洋温差能是指表层海水和深层海水之间以温度差的形式蕴藏的热能,其本质来源于太阳辐射能^[4]。海洋温差能作为极具开发利用价值和潜力的海洋能资源,在我国南海储量尤为丰富。此外,海洋温差能还具有相对稳定、能量密度较高、清洁无污染、可综合利用等特性^[5-7]。海洋温差能发电是海洋温差能开发利用的主要形式,海洋温差能发电(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)的基本原理是利用表层温海水(24~28 °C)加热低沸点工质使其气化,或采用降压方式使海水气化,产生的气态工质驱动透平做功,然后利用深层冷海水(4~6 °C)冷却做功后的乏汽使其成液态,完成发电循环^[8]。

海洋温差能发电的概念最早是由 D'Arsonval 于 1881 年提出,Anderson 于 1964 年首次提出海洋温差能发电闭式循环系统的构想,1979 年,夏威夷建成世界上第一座真正意义上的闭式循环 OTEC 装置——“MINI-OTEC”^[9]。由于海洋实际温差较小,导致循环热效率较低,这也是海洋温差能发电商业化应用发展中的关

收稿日期: 2019-05-26

资助项目: 国家自然科学基金项目——海洋温差发电混合工质热力循环二次热回收影响机理研究与试验验证(51709055);国家海洋能专项——南海温差能工程化应用前期研究(GHME2018ZC04);中韩海洋科学共同研究中心项目——中韩海洋能源开发与利用技术交流合作(PI-2018-1)

作者简介: 吴浩宇(1988-),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋能方面研究. E-mail: wuhaoyu1988@163.com

*** 通讯作者:** 刘伟民(1964-),男,研究员,博士,主要从事海洋可再生能源方面研究. E-mail: lwmxjtu@163.com

(陈 靖 编辑)

键问题之一,因此,采用高效的热力循环方式是海洋温差能发电的必要条件,也是目前研究的热点。Uehara 等^[10]对采用 Kalina 循环^[11]的 OTEC 系统进行实验并提出一种新式循环,该循环采用氨水混合溶液作为工质以及抽汽过程来提高循环热效率。Kim 等^[12]对采用不同工质和循环方式的 OTEC 系统进行了计算,发现采用 R125 的回热循环系统效率最高。Yamada 等^[13]通过对朗肯循环增加太阳能加热器来提高热海水的温度,并在久米岛实际环境温度条件下对太阳能-海洋温差能联合发电系统进行建模分析,结果表明平均热效率可提高 1.5 倍左右。Sun 等^[14-15]基于热力学第一定律和热力学第二定律对采用 Kalina 循环方式的太阳能辅助加热发电系统建模,并进行了相应的系统性能分析和设计参数优化。Faizal 等^[16]搭建了一个以 R134-a 为工质的朗肯循环 OTEC 演示系统,进行了实验及理论分析,结果发现系统的热效率和输出功随工作温差的上升而增加。Yoon 等^[17-18]利用 HYSYS 软件对不同形式的海洋温差能发电系统性能进行了分析。Kusuda 等^[19]搭建了双级朗肯循环实验装置,并将实验结果与理论计算结果进行了对比分析。Yang 等^[20]对使用有机朗肯循环的 OTEC 装置性能进行了定量研究,并提出以净输出功率与换热器总传热面积比值为目标函数来评估 OTEC 系统性能。刘煜森等^[21]采用仿真软件对 Kalina 循环海洋温差能发电系统进行研究,分析了系统中各设备的火用损失,得到氨水浓度和蒸发压力对发电循环性能的影响规律。高铁瑜等^[22]对 15 kW 混合工质海洋温差卡林纳-11 循环系统进行了计算分析,获得透平进口压力和氨质量分数的对应关系,并得到优化的系统性能参数。

本文在前期研究的基础上,提出一种新的、适用于海洋温差的热力循环方式:国海循环。针对国海循环的热力过程分析,基于热力学基本理论,分别对循环中各设备部分进行分析和建模。通过建立国海循环热力学仿真模型,模拟计算循环中关键参数对系统效率及输出功的影响规律,并与朗肯循环结果对比分析,为海洋温差能电站商业化开发提供基础数据和理论支撑。

1 热力循环基本原理

朗肯循环工作原理:海洋温差能发电系统的主要形式包括开式循环系统、闭式循环系统以及混合式循环系统。闭式循环根据工质种类不同可分为单工质循环和混合工质循环,朗肯循环是最基础的海洋温差能闭式循环,其工质一般采用单工质纯氨^[11],工作原理见图 1。朗肯循环由等熵膨胀、定压冷却、等熵压缩和定压吸热四个热力过程组成,循环中工质在蒸发器内吸收表层温海水的热量蒸发成气态,进入透平做功发电,做功后的乏汽进入冷凝器向深层冷海水放热,凝结成液态工质,被工质泵加压进入蒸发器开始下一个发电循环。朗肯循环结构简单可靠,但其蒸发过程中较大的不可逆熵损限制了循环热效率的提高^[11]。

国海循环工作原理如图 2 所示。国海循环主要设备包括蒸发器、冷凝器、透平、发电机、分离器、吸收器、回热器、节流阀、工质泵等。国海循环系统工作流程为:表层温海水作为热源加热蒸发器内的非共沸混合工质(氨水溶液),液态混合工质吸收热量后汽化,汽化后的混合工质进入分离器被分离成气态氨工质和贫氨溶液,饱和氨汽进入第一级透平膨胀做功,并带动发电机发电;第一级透平出口的部分乏汽被抽出进入回热器 2 预热混合工质溶液,然后进入吸收器,剩下的乏汽进入第二级透平做功,做功后的乏汽进入吸收器;分离器分离的贫氨溶液进入回热器 1 预热来自工质泵的氨水溶液,然后经过节流阀进入吸收器,与来自回热器 2 和第二级透平出口的工质混合,进入冷凝器与冷海水换热,被冷凝成液态混合工质进入储氨罐;储氨罐内的工质经过工质泵加压依次进入回热器 1 及回热器 2,吸收热量后部分工质汽化,再进入蒸发器吸热,完成整个

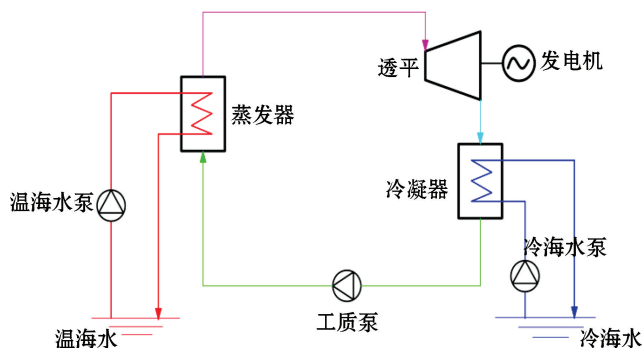


图 1 朗肯循环原理^[11]

Fig.1 Schematic diagram of the Rankine cycle^[11]

热力循环。

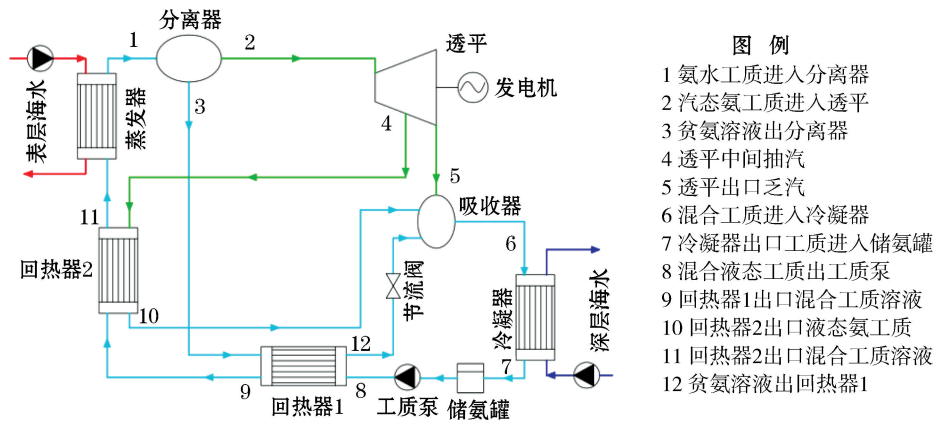


图2 国海循环原理

Fig.2 Schematic diagram of the proposed new cycle

2 仿真模型建立

为构建国海循环模型,进行了如下假设:

- 1) 忽略管道内及换热器内压降损失以及热损失;
- 2) 工质在分离器内被分离成的汽态工质和液态工质均是饱和状态,冷凝器出口工质为饱和状态,第一级透平出口抽汽为饱和状态;
- 3) 假设系统绝热;
- 4) 换热器的传热端差为 2°C 。

2.1 蒸发器部分

蒸发部分包括蒸发器和分离器,工质从回热器出口流经此部分时,被表层海水的热量加热而蒸发,然后在分离器中被分离成液态和汽态。液态工质进入回热器1,汽态工质进入透平做功。根据能量守恒方程,蒸发器内工质吸收表层海水热量 Q_{ev} 为

$$Q_{\text{ev}} = c_s m_s (T_{\text{si}} - T_{\text{so}}), \quad (1)$$

$$Q_{\text{ev}} = m_{\text{ev}} (h_1 - h_{11}), \quad (2)$$

式中: c_s 为表层海水比热 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$); m_s 为表层海水质量流量 (kg/s); T_{si} 为表层温海水进口温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{so} 为表层温海水出口温度 ($^{\circ}\text{C}$); m_{ev} 为蒸发器入口氨溶液质量流量 (kg/s); h_1 为蒸发器出口工质焓值 (kJ/kg); h_{11} 为蒸发器进口工质焓值 (kJ/kg)。

根据质量守恒分离器内:

$$m_{\text{ev}} = m_{\text{sp},l} + m_{\text{sp},v}, \quad (3)$$

式中: $m_{\text{sp},l}$ 为分离器出口氨工质溶液质量流量 (kg/s); $m_{\text{sp},v}$ 为分离器出口汽态工质质量流量 (kg/s)。

分离器内汽相、液相工质的状态参数根据确定后的蒸发器出口压力和温度可得到。

2.2 冷凝器部分

做功后的乏汽从透平出口进入吸收器,与贫氨溶液以及中间抽汽混合,继而进入冷凝器向深层冷海水放热,工质变为饱和液体。

根据质量守恒方程,冷凝器内:

$$m_{\text{con}} = m_{\text{sp},l} + m_{\text{ext}} + m_{\text{tb}}, \quad (4)$$

式中: m_{con} 为冷凝器入口氨工质质量流量(kg/s); m_{ext} 为透平中间抽汽质量流量(kg/s); m_{tb} 为第二级透平出口乏汽质量流量(kg/s)。

可由氨工质质量守恒和能量守恒得到冷凝器入口工质浓度 ω_{con} 和焓值 h_{con} :

$$m_{\text{con}} \omega_{\text{con}} = m_{\text{sp},l} \omega_{\text{sp},l} + m_{\text{ext}} \omega_{\text{ext},l} + m_{\text{tb}} \omega_{\text{tb}}, \quad (5)$$

式中: $\omega_{\text{ext},l}$ 为透平中间抽汽工质质量分数; ω_{tb} 为透平出口工质质量分数。

$$m_{\text{con}} h_{\text{con}} = m_{\text{sp},l} h_{\text{th},l} + m_{\text{ext}} h_{\text{ext},l} + m_{\text{tb}} h_{\text{tb}}, \quad (6)$$

式中: $h_{\text{th},l}$ 为节流阀出口工质焓值(kJ/kg); $h_{\text{ext},l}$ 为透平中间抽汽支路回热器 2 出口焓值(kJ/kg); h_{tb} 为第二级透平出口焓值(kJ/kg)。

冷凝器内冷海水与工质交换热量 Q_{con} :

$$Q_{\text{con}} = c_d m_d (T_{\text{di}} - T_{\text{do}}), \quad (7)$$

$$Q_{\text{con}} = m_{\text{con}} (h_6 - h_7), \quad (8)$$

式中: c_d 为深层冷海水比热(kJ/(kg · °C)); m_d 为深层冷海水质量流量(kg/s); T_{di} 为冷凝器深层冷海水进口温度(°C); T_{do} 为冷凝器深层冷海水出口温度(°C); h_6 为冷凝器进口工质焓值(kJ/kg); h_7 为冷凝器出口液态工质焓值(kJ/kg)。

2.3 透平

透平是温差能发电循环中的关键设备,氨蒸汽的能量推动透平旋转带动发电机做功,最终转换成电能。国海循环采用了双级透平,并将第一级透平出口的工质乏汽部分抽出送入回热器。双级透平中间抽汽压力为

$$P_{\text{ext}} = P_4 = \frac{P_{\text{sp},v} + P_{\text{tb},o}}{2}, \quad (9)$$

式中: $P_{\text{tb},o}$ 为透平出口压力(Pa)。

$$\eta_s = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_{\text{tb},s}}, \quad (10)$$

式中: η_s 为透平等熵效率,此处取 0.8; $h_{\text{tb},s}$ 为氨蒸汽等熵膨胀到抽汽压力 P_4 时的焓值(kJ/kg); h_4 为双级透平中间抽汽焓值(kJ/kg); $h_2 = h_{\text{sp},v}$ 。

2.4 工质泵

OTEC 系统中,工质泵不仅输送工质且对工质进行增压,工质泵出口焓值 $h_8 = h_{\text{p},o}$, $h_{\text{p},o}$ 可经过式(15)计算得到

$$m_p (h_{\text{p},o} - h_{\text{p},i}) = \eta_c W_g \quad (11)$$

式中: $h_{\text{p},i}$ 为工质泵入口焓值(kJ/kg); m_p 为工质泵内工质流量(kg/s); η_c 为工质泵的效率; W_g 为工质泵的电机功率(kW)。

2.5 回热器

回热器 1 中,经由工质泵加压的饱和和液态工质吸收来自分离器的贫氨溶液热量,预热后进入回热器 2,在回热器 2 中被透平的中间抽汽加热,然后进入蒸发器。

回热器 1:

$$m_{\text{rel}} (h_9 - h_8) = m_{\text{sp},l} (h_{12} - h_{\text{sp},l}), \quad (12)$$

式中: h_9 为回热器 1 出口工质焓值(kJ/kg); m_{rel} 为回热器 1 中工质流量(kg/s); h_{12} 为回热器 1 出口贫氨溶液焓值(kJ/kg)。

回热器 2:

$$m_{\text{re}2}(h_{11}-h_9)=m_{\text{ext}}(h_4-h_{10}),$$

(13)

式中: $m_{\text{re}2}$ 为回热器 2 中工质流量, (kg/s); h_{10} 为回热器 2 出口工质焓值, (kJ/kg); 其中 $h_{10}=h_{\text{ext},1}$ 。

2.6 节流阀

在循环中, 节流阀起到调节流速和降低压力的作用, 节流阀质量流量 m_{th} 为

$$m_{\text{th}}=kA\left(\rho\Delta P\right)^{0.5},$$

(14)

式中: k 为节流系数; A 为流通面积(m^2); ΔP 为节流阀前后压差(Pa); ρ 为工质密度(kg/m^3)。

2.7 循环效率

循环热效率是衡量发电系统循环的重要指标, 海洋温差能发电系统循环热效率等于循环净输出功和系统吸热量的比值:

$$\eta=\frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{ev}}}=\frac{W_{\text{tb}}-W_{\text{p}}}{Q_{\text{ev}}}=\frac{m_{\text{sp},v}(h_2-h_4)+m_{\text{tb},2}(h_4-h_5)-W_{\text{p}}}{m_{\text{ev}}(h_1-h_{11})},$$

(15)

式中: W_{net} 为循环系统净输出功(kJ); Q_{ev} 为工质在蒸发器内吸收温海水的热量(kJ); W_{tb} 为透平输出功(kJ); W_{p} 为泵耗功(kJ)。

3 结果及讨论

国海循环模型的计算条件见表 1。基于构建的海洋温差能发电系统(OTEC)循环仿真模型, 针对我国实际海域温度、气候情况及前期研究^[1,8], 选择温海水温度和冷海水温度分别为 27 和 5℃, 换热器端差为 2℃条件下, 模拟计算朗肯循环和国海循环。工质选择常用的氨及氨水混合工质, 工质的热物理性质及在循环中的状态参数由美国国家标准与技术研究院开发的 REFPROP 软件和 Gibbs 自由能方程计算得到。

表 1 国海循环计算条件
Table 1 Simulation conditions for the proposed new cycle

要素	参数	要素	参数
工质	氨水	表层温海水温度 $T_s/^\circ\text{C}$	27
深层冷海水温度 $T_d/^\circ\text{C}$	5	工质蒸发温度 $T_{\text{ev}}/^\circ\text{C}$	23
换热器端差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	2	透平等熵效率/%	80
工质泵效率/%	60	海水泵效率/%	80
发电机效率/%	95		

3.1 循环效率对比分析

循环效率是衡量温差能发电系统性能的重要指标之一, 而透平进口蒸汽压力又是影响循环热效率的一个关键因素。由图 3 可知, 朗肯循环和国海循环热效率均随透平进口蒸汽压力的升高而逐渐增加, 但当进口压力超过某一定值时, 循环热效率迅速下降。这是因为随着透平进口蒸汽压力提高, 平均吸热温度升高, 透平进口蒸汽做功能力增强使得透平输出功增加, 循环净输出功随之增大, 因此循环热效率提高。而当透平进口压力继续增加时, 朗肯循环中氨由气态转化成液态, 透平做功能力迅速下降; 国海循环中氨水混合工质受透平进口压力增加影响, 进入透平的氨气减少, 氨蒸汽在透平内做功随之快速减小, 而吸热量近似不变, 导致循环热效率迅速降低。

图 3 所示朗肯循环及国海循环均存在一个最大效率值, 此时对应的是最佳透平进口压力。朗肯循环透

平进口蒸汽压力为 0.942 83 MPa, 循环热效率为 3.628%; 国海循环透平进口压力为 0.83 MPa, 循环热效率为 4.565%。图 4 所示为最佳透平进口压力下, 朗肯循环和国海循环的热效率值, 国海循环热效率相比朗肯循环提高了 25.9%。而在相同透平进口压力下(如 0.83 MPa), 朗肯循环及国海循环的热效率分别为 2.624%, 4.565%, 国海循环热效率相比朗肯循环提高了 73.9%。

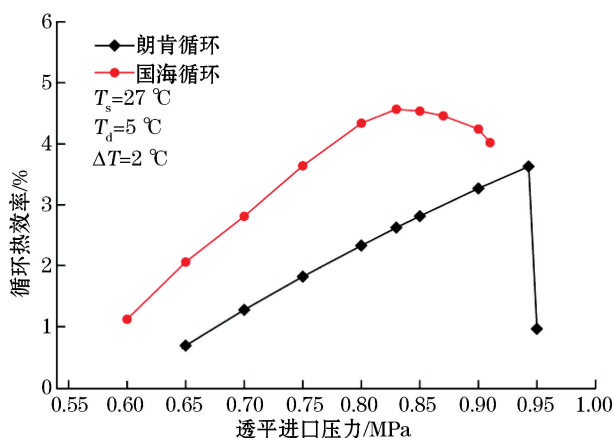


图 3 循环热效率随透平进口压力变化关系

Fig.3 The relationship between thermal cycle efficiency and turbine inlet pressure

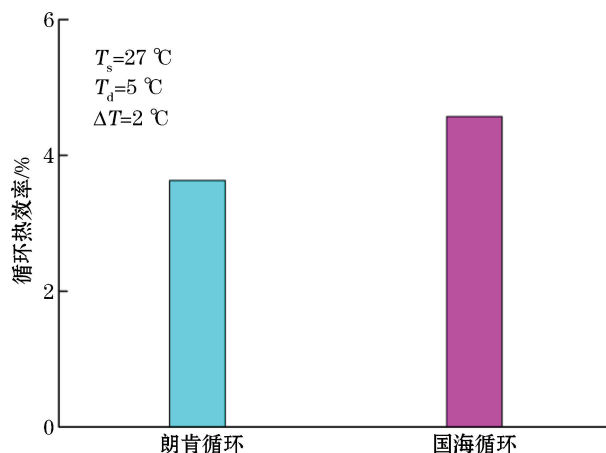


图 4 朗肯循环及国海循环热效率对比

Fig.4 Comparison of the thermal cycle efficiency between Rankine cycle and Guohai cycle

3.2 循环输出功对比分析

海洋温差能发电系统的性能不仅取决于循环热效率大小, 还和系统做功能力直接相关。由图 5 可知, 透平净输出功随透平进口压力变化趋势与循环效率变化规律类似, 均是先随透平进口压力增大而增加, 继而逐渐减小, 当超过某一压力时, 输出功迅速降低。同时可以看出透平净输出功的增大速率呈现逐渐下降的特点, 存在一个最佳压力, 使得透平净输出功达到最大值。

以 15 kW 透平输出功为例, 分别对朗肯循环及国海循环的净输出功及泵功进行计算, 并对比分析。图 6 所示为朗肯循环及国海循环的泵功对比, 可以看到, 朗肯循环的温海水泵耗功及冷海水泵耗功均比国海循环要大, 而国海循环的工质泵耗功则高于朗肯循环。由于国海循环采用氨水工质, 在蒸发过程中属于变温蒸发, 虽然和热源温度匹配更好, 但工质并未完全蒸发, 所需工质流量更大。同时由图 6 可以明显看出, 温、冷海水泵的泵功在总泵功中占比较大, 相比之下, 工质泵耗功则要小得多。当泵功仅考虑工质泵耗功时, 朗肯循环的系统净输出功比国海循环略大(图 7); 而将温海水泵功、冷海水泵功以及工质泵功之和作为总泵功, 国海循环的系统净输出功为 7.038 kW, 明显高于朗肯循环的 5.343 kW, 提高了 31.7%(图 8)。由于国海循环效率的提高, 冷、热海水流量随之降低, 冷海水泵和热海水泵的功耗也相应减小, 因此, 国海循环的净输出功增加。在温差能发电循环的研究中, 循环效率一般仅考虑工质泵耗功, 而海洋温差能电站实际运行中, 冷、热海水泵的能耗是评价发电系统经济性的重要指标, 不能忽略。因此, 在相同的装机功率及工况条件下, 国海循环的净输出功更大, 经济效益更佳。

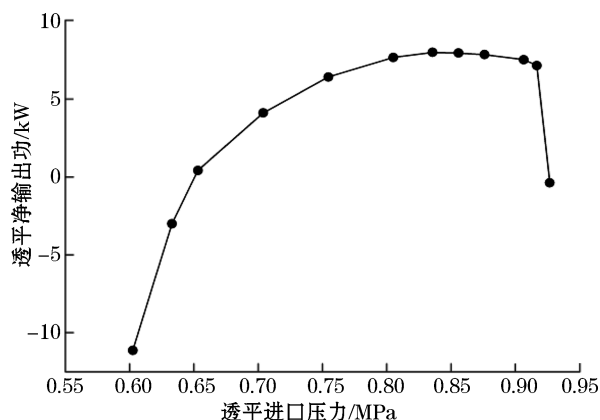


图5 国海循环透平净输出功随透平进口压力变化关系
Fig.5 The variations of net output power with turbine inlet pressure in the Guohai cycle

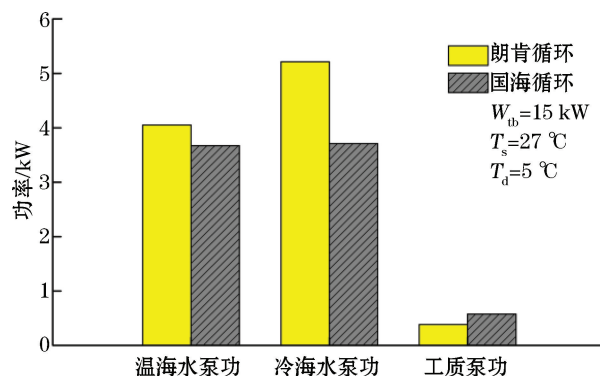


图6 朗肯循环及国海循环的泵功对比
Fig.6 Comparison of the pump work between Rankine cycle and Guohai cycle

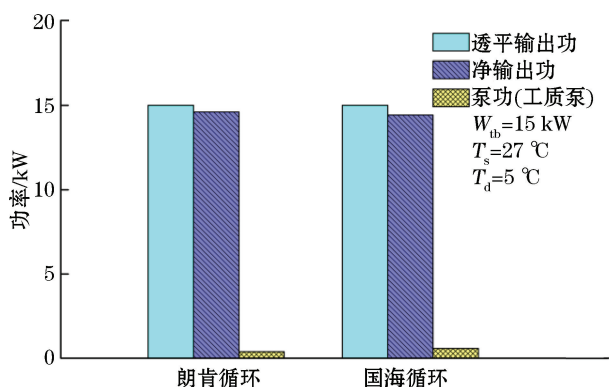


图7 朗肯循环及国海循环的净输出功及泵功对比
Fig.7 Comparison of the net output power and the pump work between Rankine cycle and Guohai cycle

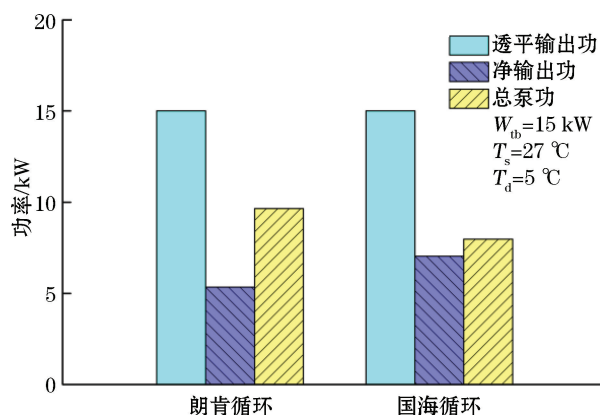


图8 朗肯循环及国海循环的净输出功及总泵功对比
Fig.8 Comparison of the net output power and the total pump work between Rankine cycle and Guohai cycle

4 结 论

本文基于能量守恒和热力学定律,分别对采用朗肯循环和国海循环的海洋温差能系统进行了理论分析,构建了采用氨水混合工质的新循环系统热力模型,并从循环热效率及净输出功等方面进行了分析计算,对比研究了朗肯循环及国海循环的热力性能,得出结论:

1)通过设置贫氨溶液热回收和乏汽余热回收,充分利用贫氨溶液和乏汽的剩余热量,有效地提高了温差转换效率,循环热效率和透平净输出功均有明显提升。

2)新循环的循环效率和净输出功均随透平进口压力先增大后减小,循环效率及净输出功均存在相对应的最佳透平进口压力。

3)15 kW 等级的国海循环发电系统中,工质泵耗功对净输出功影响不大,考虑冷海水泵和热水水泵的泵功,系统净输出功为 7.038 kW,明显高于朗肯循环的 5.343 kW,提高了 31.7%。

4)相比朗肯循环,采用国海循环的海洋温差能发电系统性能优于朗肯循环发电系统。在相同冷热源工况条件下,国海循环发电系统的净输出功和循环效率均明显高于朗肯循环。

参考文献(References):

- [1] SHI W Y, WANG C K, SHEN J F. Utilization and prospect of ocean energy resource in China[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(6): 913-923. 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.
- [2] WANG S J, YUAN P, LI D, et al. An overview of ocean renewable energy in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 91-111.
- [3] KIM C N, MUHAMMAD W S. Sustainable desalination using ocean thermocline energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 240-246.
- [4] KHAN N, KALAIR A, ABAS N, et al. Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 590-604.
- [5] YUE J, LIU W M, ZHANG L, et al. Study on the optimization of rankine cycle using ammonia working fluid for ocean thermal energy conversion[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(4): 31-38. 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.
- [6] FUJITA R, MARKHAM A C, DIAZ J E D, et al. Revisiting ocean thermal energy conversion[J]. *Marine Policy*, 2012, 36(2): 463-465.
- [7] LIU W M, MA C L, CHEN F Y, et al. Exploitation and technical progress of marine renewable energy[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(1): 1-18. 刘伟民, 麻常雷, 陈风云, 等. 海洋可再生能源开发利用与技术进展[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(1): 1-18.
- [8] SU J C, ZENG H Y, XIAO G, et al. Research status and prospect of ocean thermal energy conversion technology[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 84-98. 苏佳纯, 曾恒一, 肖钢, 等. 海洋温差能发电技术研究现状及在我国的发展前景[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 84-98.
- [9] LIU W M, CHEN F Y, WANG Y Q, et al. Progress of closed-cycle OTEC and study of a new cycle of OTEC[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(35-355): 275-278.
- [10] UEHARA H, IKEGAMI Y, NISHIDA T. Performance analysis of OTEC system using a cycle with absorption and extraction processes[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1998, 64(624): 2750-2755.
- [11] KALINA A I. Combined-cycle system with novel bottoming cycle[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, 106(4): 737-742.
- [12] KIM N J, NG K C, CHUN W. Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(10): 1008-1013.
- [13] YAMADA N, HOSHI A, IKEGAMI Y. Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1752-1758.
- [14] SUN F, ZHOU W, NAKAGAMI K. Energy-economic analysis and configuration design of the Kalina solar-OTEC system[J]. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2013, 5(2): 187-191.
- [15] SUN F, ZHOU W, IKEGAMI Y, et al. Energy-exergy analysis and optimization of the solar-boosted Kalina cycle system 11 (KCS-11)[J]. *Renewable Energy*, 2014, 66: 268-279.
- [16] FAIZAL M, AHMED M R. Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC plant working on small temperature difference[J]. *Renewable Energy*, 2013, 51(2): 234-240.
- [17] YOON J I, SON C H, BAEK S M, et al. Performance characteristics of a high-efficiency R717 OTEC power cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 72(2): 304-308.
- [18] YOON J I, SON C H, SEOL S H, et al. Performance analysis of OTEC power cycle with a liquid-vapor ejector using R32/R152a[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2015, 51(11): 1597-1605.
- [19] KUSUDA E, MOROSAKI T, IKEGAMI Y. Performance test of double-stage rankine cycle experimental plant for OTEC[J]. *Procedia Engineering*, 2015(105): 713-718.
- [20] YANG M H, YEH R H. Analysis of optimization in an OTEC plant using organic Rankine cycle[J]. *Renewable Energy*, 2014, 68(3): 25-34.
- [21] LIU Y S, ZHANG H, ZHAO W. Study on the performance of Kalina ocean thermal energy conversion cycle[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(2): 105-110. 刘煜森, 张华, 赵巍. 卡琳娜海洋温差发电循环性能研究[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(2): 105-110.
- [22] GAO T Y, GONG J Y, QIAN J Y. Study on the performance of the 15 kW OTEC system with KSC-11 Cycle[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2012, 33(2): 343-348. 高铁瑜, 龚建英, 钱继扬. 15kW 等级闭式海洋温差 KSC-11 发电系统的性能分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(2): 343-348.

Study on Performance Analysis of the High-efficiency OTEC Cycle

WU Hao-yu, PENG Jing-ping, GE Yun-zheng, LIU Lei, CHEN Feng-yun, LIU Wei-min

(*First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The ocean thermal energy is an eco-friendly and sustainable clean energy, and yet its low system efficiency impedes its commercial application of the ocean thermal energy conversion (OTEC). In this study, we proposed a new cycle with regeneration and vapor extraction processes, which uses ammonia-water mixture as working fluid. By analyzing and modeling the each part of the cycle, we constructed the thermodynamic model of the new cycle, based on the energy conservation and Thermodynamic theory. Compared to the basic OTEC cycle—Rankine cycle, the thermal efficiency and net output power of the new cycle is significantly higher. The thermal efficiency of the new cycle is up to 4.565%, which is 25.9% higher than that of Rankine cycle. Moreover, under the same turbine output power and simulation conditions, the net output power of the new cycle is 7.038 kW, which is higher than that of the Rankine cycle (5.343 kW). Through the performance analysis of the simulation model for the proposed OTEC cycle, it will provide basic design data for development and utilization of an OTEC system.

Key words: OTEC; Rankine cycle; thermal cycle efficiency; net output power

Received: May 26, 2019