

朗肯循环海洋温差能发电系统性能理论分析与试验

陈风云, 刘蕾, 彭景平, 葛云征, 刘伟民*, 王泉斌

自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要 针对海洋温差发电系统中效率低的问题, 对海洋温差发电朗肯循环进行了理论分析, 建立了系统中关键设备数学模型, 计算了发电系统循环热效率、净输出功率。通过计算得到: 当透平进口气体温度和冷凝温度一定时, 循环热效率随透平进口气体压力的增大先升高后降低, 且存在最大值。研建了 15 kW 朗肯循环海洋温差能发电系统并试验验证, 得到了在模拟海洋温差下循环热效率随各参数的变化趋势与规律, 同时与理论计算结果比较, 验证了理论计算结果的可靠性。

关键词 海洋温差能; 热效率; 净输出功率

随着社会的发展, 对能源的需求越来越大, 常规化石能源的消耗同时也带来了严重的环境污染问题, 利用可再生能源成为解决能源短缺和降低污染的途径之一^[1]。中国作为海洋大国, 开发利用海洋能已成为未来能源战略的重要选择^[2]。海洋温差能因其储量巨大、可再生和多用途等特点备受关注^[3], 但由于海洋温差较小, 存在发电效率低和成本高的问题^[4]。

澳大利亚学者 Faizal 等^[5]对采用 R134a 为工质的海洋温差朗肯循环发电系统进行计算, 系统最大

热力循环效率为 1.5%。2014 年, 韩国 Yoon 等^[6]对利用不同工质的海洋温差发电系统的性能进行研究, 结果表明在湿流体中, 海洋温差热力循环性能最优和最差的工质分别是 R717 和 R404A, 在干流体中, 热力循环效率最高的工质为 R22。吴春旭等^[7]通过对温差发电系统不同工质比较得到正戊烷具有最高的热效率、大的净功及最小的气耗率, 氨的做功能力远强于有机工质。

在上述研究的基础上对朗肯循环海洋温差发电系统开展理论分析、数值计算和试验研究, 探索

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41976204); 中韩海洋能源开发与利用技术交流合作项目(PI-2018-4); 青岛市蓝色经济区建设专项资金扶持项目(Q1402); 国家自然科学基金青年基金项目(51709055)

作者简介: 陈风云, 助理研究员, 研究方向为海洋温差能开发利用, 电子信箱: cfyqdu2000@163.com; 刘伟民(通信作者), 研究员, 研究方向为海洋温差能开发利用, 电子信箱: lwmxjtu@163.com

引用格式: 陈风云, 刘蕾, 彭景平, 等. 朗肯循环海洋温差能发电系统性能理论分析与试验[J]. 科技导报, 2020, 39(6): 90-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.013

提高转换性能的理论和技术途径,为海洋温差发电循环系统的设计和运行提供依据。

1 温差发电系统原理及过程分析

1.1 循环原理

在海洋温差发电中基础的循环方式为朗肯循环,大多采用纯氨为工质^[8],循环原理如图1所示,图1中数字1~8代表循环中关键节点位置。循环中主要设备为蒸发器、冷凝器、透平、发电机、工质泵。详细流程如下:低沸点工质在蒸发器内吸收表层温海水的热量蒸发,产生的气体进入透平推动其旋转,带动发电机发电,在透平内做功后的乏气随后进入冷凝器,在冷凝器内被深层冷海水冷凝变成液体随之进入工质泵,被工质泵泵入蒸发器进行下一个循环^[9]。

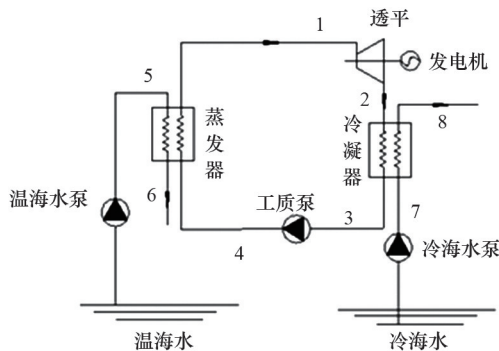
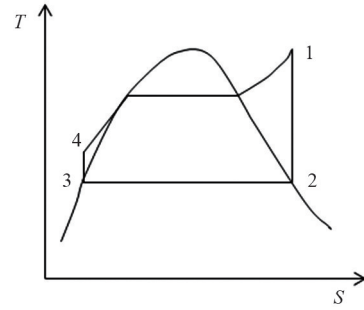


图1 朗肯循环原理

1.2 关键设备热力分析

朗肯循环为第一个具有实践意义的动力循环,由4个步骤组成,循环过程 $T-S$ 如图2所示,图2中数字1~4对照图1中位置。

在海洋温差发电热力循环理论分析过程中,为了使循环过程便于计算,对过程进行以下简化:(1)温、冷海水及循环工质均处于定常流动稳定状态;(2)工质在泵里的加压和透平里的膨胀均是等熵过程;(3)忽略管道及设备对外散热损失;(4)忽略工质在蒸发器、冷凝器和管路里的流动阻力;(5)蒸发器、冷凝器换热端差均选 2°C ;(6)在计算过程



1→2为高压气体在透平内做功的过程;2→3为透平乏气在冷凝器内冷凝的过程;3→4为液态工质在工质泵内加压的过程;4→1为工质在蒸发器内吸热蒸发的过程

图2 朗肯循环热力过程 $T-S$ 示意

中,温海水温度范围为 $22\sim 28^{\circ}\text{C}$,冷海水温度为 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。

各设备状态方程如下。

蒸发器

$$\begin{aligned} Q_E &= M_f(h_1 - h_4) = M_E(h_5 - h_6) \\ &= M_E c_p(T_5 - T_6) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, M_f 为循环系统中氨水工质的理论流量, kg/s ; M_E 为温海水流量, kg/s ; c_p 为温海水定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

工质在透平内的绝热膨胀做功为

$$W_T = M_f(h_1 - h_2) \quad (2)$$

冷凝器

$$M_f(h_2 - h_3) = M_C(h_8 - h_7) = M_C C_L(T_8 - T_7) \quad (3)$$

式中, M_C 为温差能热力系统中循环所需要的冷海水的理论流量, kg/s ; C_L 为冷海水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

工质泵

$$W_P = M_f(h_4 - h_3) \quad (4)$$

式中, W_P 为工质泵的功率, W 。

单位质量工质时泵的功耗 w 为

$$w = \int_{P_3}^{P_4} v dp \approx \bar{v}(P_4 - P_3) \quad (5)$$

则工质泵出口处工质的焓值为

$$h_4 = h_3 + \bar{v}(P_4 - P_3) \quad (6)$$

循环热效率

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_E} = \frac{W_T - W_P}{Q_E} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (7)$$

2 理论计算结果分析

2.1 透平进口压力对系统的影响

通过上述循环热效率分析可知,热效率的影响因素是气体在透平内的做功大小和在蒸发器内的吸热量。气体在透平内的做功即工质在透平内的焓降,焓降则与透平进出口气体的压力有关,根据理论计算结果,绘制了循环热效率与透平进口压力的关系(图3)。

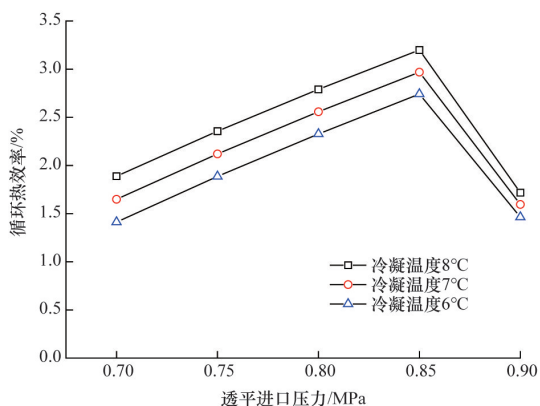


图3 透平进口压力与循环热效率关系

从图3可以看出,当透平进口气体温度为21°C时,在冷凝温度一定的情况下,循环热效率随着透平进口压力的增大而增大,当到达一定值后,热效率随着压力的增大而降低。

这是因为当透平进口气体压力小于0.85 MPa时,随着透平进口气体压力的增大,平均蒸发温度升高,此时的平均吸热温度增大;而此时冷凝温度不变,则透平出口处压力不变,即透平出口处乏气焓值不变,平均放热温度不变,故气体在透平内做功增大,蒸发器的吸热量基本保持不变,因此热力循环效率增大。从图3还可以看出,当透平进口的气体压力继续增大,此时循环热效率明显降低。这是因为当透平进口气体温度一定,即透平进口温度为21°C时,此时氨蒸气的饱和压力为0.88 MPa,当压力继续增大至0.9 MPa时,此时透平进口处1点的状态变为液态,故循环热效率降低。

通过上面的分析可知:当透平进口气体温度和冷凝温度一定时,随着透平进口气体压力的增大循

环热效率升高,且存在最大值;因此当透平进口气体温度一定时,不能一味加大透平进口气体的压力来提高循环热效率,此时对不同的透平进口温度均有相对应的最优透平进口气体压力值;当透平进口气体温度升高,此时对应的最优透平进口气体压力值也升高。

2.2 冷凝温度对循环热效率影响

透平进口气体压力是影响海洋温差发电循环热效率的关键参数,这2个参数的调节较容易实现。而冷海水温度受季节和气候等因素的影响,难以实现人为控制,因此,从系统安全经济运行的角度,需要研究温海水和冷海水温度发生变化时对循环系统的影响。

根据卡诺循环和热力学第二定律可知,冷凝温度对热能转换性能有很大影响,在海洋温差发电系统中,根据热力过程分析可知冷凝温度影响着透平出口的背压,因此也是影响循环热力性能的一个重要参数。将理论计算的循环热效率随冷凝温度的变化结果绘制成图4,显示了蒸发温度为26°C时,在不同透平进口气体压力下循环热效率随冷凝温度的变化关系。

从图4可以看出,在同一透平进口气体压力下,海洋温差发电循环热效率随着冷凝温度的升高而线性降低。当透平进口压力0.85 MPa时,冷凝温度由6°C升高到9°C时,循环热效率由3.50%下降至2.80%,下降幅度达20%。

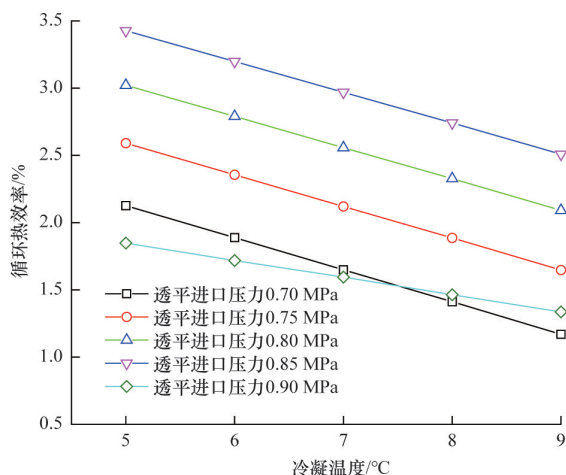


图4 冷凝温度与循环热效率的关系

这是因为在透平进口气体参数不变的工况下, 冷凝温度提高后, 透平出口处的压力和焓值增大, 根据透平做功计算公式可知气体在透平内做功量减少; 而此时工质在透平进口处的压力、温度保持不变。根据循环工质的温熵图可知: 工质在冷凝器出口被工质泵加压变为过冷液体, 然后进入蒸发器吸收热量, 由于工质在蒸发器内的吸热量主要用于工质的蒸发相变过程, 因此工质在蒸发器内的吸热量基本保持不变。根据循环热效率计算公式可知, 透平做功量减少, 而蒸发器吸热量基本不变, 故循环热效率降低。相反, 随着冷凝温度的降低, 透平做功量大幅增加, 循环热效率则升高。

3 试验结果分析与比较

在海洋温差发电系统朗肯循环过程理论分析计算的基础上, 设计并研建了 15 kW 海洋温差发电系统^[10], 系统中采用氨工质, 试验系统如图 5 所示。



图5 15 kW 海洋温差发电系统

在实验过程中, 用电厂蒸汽加热普通海水来模拟温海水, 常温海水来模拟冷海水, 模拟海洋温差值。通过实验系统运行, 得到了各测点的实验数据, 并通过数据分析与处理, 得到了系统效率的变化规律。

3.1 循环效率与透平进口压力关系

由于在 15 kW 海洋温差发电系统中采用的实验室模拟温海水温差, 故在计算结果对比时, 理论计算同样采用了相同状态下的温、冷海水温度。当蒸发温度为 41℃, 冷凝温度 21℃时, 循环效率随透

平进口压力变化规律理论和实验结果比较如图 6 所示。

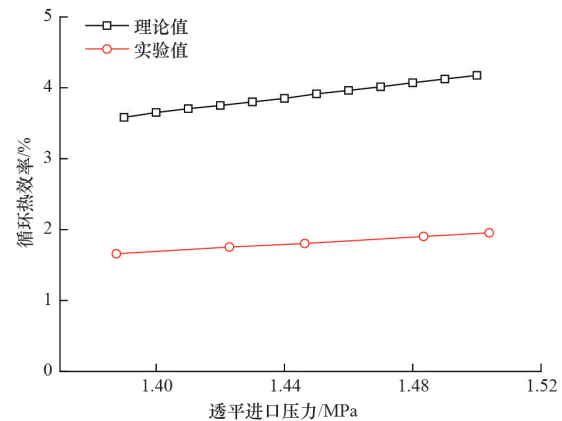


图6 透平进口压力与循环热效率关系理论与实验比较

由图 6 可以看出, 理论计算和实验结果的循环热效率均随着透平进口压力的增大而增大, 验证了在此压力范围内理论计算结果规律的准确性。且在实验透平压力范围内循环效率的理论计算值均大于实验系统测定值。

当透平进口压力从 1.3 MPa 增大到 1.5 MPa 时, 实验系统循环热效率由 1.66% 上升到 1.95%, 且实验结果值明显低于理论计算结果。当透平进口压力为 1.44 MPa 时, 理论计算的循环热效率为 3.85%, 而此时根据实验各点测定数据得到的循环热效率仅为 1.80%, 实际值只为理论计算结果的 47%。究其原因主要存在以下方面: (1) 实际运行过程中, 由于存在发电机效率 90% (发电机参数得到), 机械传动效率 92%, 逆变整流效率 90% (经验参数), 3 种效率的存在使得系统发电效率降低了 74.92%; (2) 热效率的理论计算值只考虑了循环本身内部件的效率, 故只考虑了氨透平的设计效率为 80%, 但是在实际运行过程中, 氨透平效率实际偏低。按照上述计算结果可知, 氨透平及系统内其他效率为 50% 左右。

3.2 循环效率与冷海水温度关系

同样对循环效率随着冷海水温度变化规律的实验结果与理论值进行对比分析, 结果如图 7 所示。图 7 为当透平进口气体温度为 42℃、压力为 1.35 MPa 时, 循环效率随冷海水温度的变化关系。

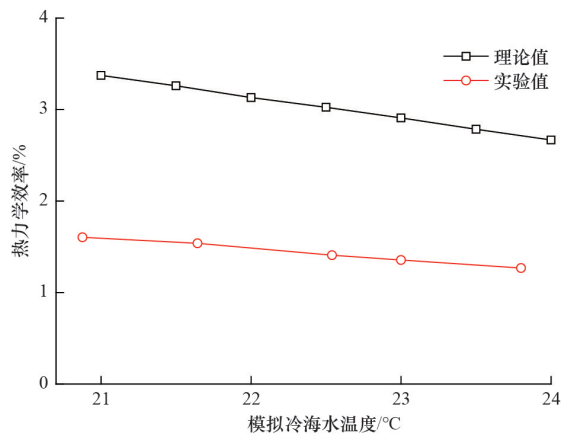


图7 冷海水温度与循环热效率关系理论与实验比较

从图7可以看出,理论计算与实验系统测定两种结果下循环热效率与冷海水温度的变化规律一致,均是随着冷海水温度的增加效率线性下降,同样实验值低于理论值。当模拟冷海水温度从21℃升高至24℃时,理论计算结果值由3.74%下降至2.67%,温度升高3℃,循环效率降幅为29%;实验结果值由1.60%下降到1.27%,降幅同样也达21%。从图7中还可以看出,当模拟冷海水温度值为23℃时,理论计算效率为2.91%,实验值为1.36%,实验值仅为理论值的46.7%。与透平进口压力影响分析一样,当系统内发电机效率、机械效率、逆变整流效率共为74.52%时,按照理论分析结果,则系统效率应为2.17%,此时计算结果同样是按照透平效率为80%计算,不考虑透平功率,系统效率应为2.71%,而此时实验值仅为1.36%,同样是理论值的50%左右,因此,按照上述分析结果,在该系统中透平效率为50%左右。

根据以上对透平进口温度、冷海水温度对循环效率的影响分析可知,在已知温、冷海水温度,氨透平效率是影响海洋温差发电系统实际发电效率的关键因素。

4 结论

通过对朗肯循环热力过程及各设备的分析,得到了海洋温差发电循环热效率随透平进口气体压力、冷凝温度的变化规律,并将理论与实验结果进

行比较,得到以下结论。

1) 当蒸发温度和冷凝温度一定时,循环热效率均随着透平进口压力的升高而增大;对不同的透平进口气体温度均对应一最佳透平进口气体压力,使得此时系统循环热效率最高,且最佳透平进口气体压力值随着其温度的升高而增大;

2) 透平进口气体温度、压力一定时,循环热效率随冷海水温度的升高而降低,因此在实际海上电站建设过程中要关注冷海水管道材质和结构的选取,降低冷海水输送过程中与外界的换热。

3) 通过对15 kW朗肯循环海洋温差能发电系统中各测点数据的测量,得到模拟状态下循环热效率与透平进口气体压力的变化关系并与理论计算相比较,两者变化规律一致,实验结果低于理论计算结果。

参考文献 (References)

- [1] 陈风云, 刘伟民, 彭景平. 海洋温差能发电技术的发展与展望[J]. 绿色科技, 2012(11): 246-248.
- [2] 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): 1-17.
- [3] 李大树, 陈荣旗, 张理. 海洋温差能发电热力循环技术进展[J]. 工业加热, 2016, 45(4): 6-13.
- [4] 彭景平. 15 kW海洋温差发电系统的试验与研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [5] Faizal M, Ahmed M R. Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC Plant working on small temperature difference[J]. Renew Energy, 2013, 51: 234-240.
- [6] Yoon J I, Son C H, Baek S M, et al. Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids[J]. Heat Mass Transfer, 2014, 50: 985-996.
- [7] 吴春旭, 林礼群, 王幸, 等. 闭式海洋温差能发电系统的工质研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 1064-1070.
- [8] 邓立生, 黄宏宇, 何兆红, 等. 有机朗肯循环的研究进展[J]. 新能源进展, 2014, 2(3): 180-189.
- [9] Chen H, Goswami D Y, Stefanakos E K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010; 14: 3059-3067.
- [10] 刘伟民. 15 kW温差能发电装置研究及试验[J]. 中国科技成果, 2014, 15(10): 17.

Theoretical analysis and experimental study of ocean thermal energy conversion plant of Rankine cycle

CHEN Fengyun, LIU Lei, PENG Jingping, GE Yunzheng, LIU Weimin*, WANG Quanbin

The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract In view of the the low efficiency of the ocean thermal energy conversion(OTEC), this paper makes a theoretical analysis of the Rankine cycle based on the first law and the second law of thermodynamics, and a mathematical model for the individual equipment of the cycle is built. Through the calculations of the cycle thermal efficiency and the net power output, the variations of the thermal efficiency and the net power output against the turbine inlet pressure, the superheat and the condensation temperature are obtained. A 15 kW ocean thermal energy conversion system with the Rankine cycle is constructed and tested, and the variations of the thermal efficiency against various parameters under the simulated working conditions of the ocean temperature difference are obtained through analyzing the experiment results. The consistency between the theoretical calculations and the experimental results is verified.

Keywords ocean thermal energy conversion; thermal efficiency; net output ●



(责任编辑 刘志远)