

采用温差发电-有机朗肯循环联合系统的船舶余热利用实验研究

叶文祥, 柳长昕, 刘健豪, 赵聪, 代天伦, 马科飞

(大连海事大学轮机工程学院, 116026, 辽宁大连)

摘要: 为了实现具有复杂特性的船舶多种余热的高效回收,提出了一种基于温差发电-有机朗肯循环(TEG-ORC)联合循环的船舶余热梯级利用系统。根据底循环对主机烟气的利用量,定义了TEG/ORC底循环比参数。通过实验研究,探索了在ORC蒸发压力为0.9 MPa的工况下,系统输出功率、热效率、多级余热利用量和发电成本等重要性能参数随底循环比的变化规律,并对联合循环系统的性能及其影响规律进行了评估。实验设计了热管强化换热装置用以克服前期研究中发现的TEG底循环热端换热瓶颈。结果表明:3种底循环比(0.369、0.508、0.615)工况下的实验结果与模拟结果基本一致;TEG-ORC联合循环系统更好地利用了多种船舶余热及TEG底循环的冷却散热,提升了余热利用性能和输出功率,使其热效率高于各底循环且发电成本低于各底循环;在TEG/ORC底循环比为0.615时,联合系统输出功率为134.50 W,热效率为6.93%,发电成本为3.32元/(kW·h)。TEG-ORC联合循环可实现船舶多种烟气余热的梯级利用,提高余热利用量,并提升ORC底循环运行的稳定性和安全性。

关键词: 船舶余热;梯级利用;底循环比;TEG-ORC联合循环

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202008007 **文章编号:** 0253-987X(2020)08-0050-08



OSID 码

Experimental Research of Ship Waste Heat Utilization by TEG-ORC Combined Cycle

YE Wenxiang, LIU Changxin, LIU Jianhao, ZHAO Cong, DAI Tianlun, MA Kefei

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: A waste heat cascade recovery system based on thermoelectric generation/organic Rankine cycle (TEG-ORC) combined cycle is proposed to achieve efficient recovery for various waste heat of vessels. A bottom cycle ratio parameter of TEG/ORC is defined according to the waste heat utilization of the main engine flue gas by different bottom cycles. Through subsequent experimental research, the law of main performance parameters such as system output power, thermal efficiency, multi-stage waste heat utilization and cost changing with bottom cycle ratio is studied under the condition of 0.9 MPa ORC evaporation pressure. Moreover, the performance of the combined cycle system and its parameter influence are evaluated. A heat pipe enhanced heat exchange device is designed in the experiment to overcome the heat exchange bottleneck in the hot end of the TEG bottom cycle. The experimental results from three groups with different bottom cycle ratios (0.369, 0.508, 0.615) are basically consistent with simulation results. It indicate

收稿日期: 2020-03-05。 作者简介: 叶文祥(1995—),男,硕士生;柳长昕(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC14046);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132018255,3132019330)。

网络出版时间: 2020-04-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200415.1541.002.html>

that TEG-ORC combined cycle makes better use of multiple waste heat and heat dissipation of TEG bottom cycle, improves waste heat utilization performance and output power, and the thermal efficiency is higher than each bottom cycle while the power generation cost is lower than each bottom cycle. When the bottom cycle ratio is 0.615, the output power, thermal efficiency, and power generation cost of the combined cycle is 134.50 W, 6.93% and 3.32 Yuan/(kW·h) respectively. TEG-ORC combined cycle realizes the cascade utilization of vessel multiple flue gas waste heat, improves the utilization of waste heat, the stability and safety of ORC bottom cycle operation.

Keywords: vessel waste heat; cascade utilization; bottom cycle ratio; TEG-ORC combined cycle

海运业承载了全球 90% 以上的商品贸易货运量,船舶作为其主要载体,存在能耗较大、余热浪费严重的弊端^[1]。据统计,能耗占船舶运营总成本的比例,小型运输船约为 25%~30%,定期客货船约为 35%,散货船约占 50%,油船约为 60%^[2]。国际海事组织(IMO)和欧盟出台多项针对船舶排放与能效的强制性规定并于 2018 年开始实施。世界各国研究基于余热回收的船舶能效提升技术,既是应对严苛法律法规的迫切需求,也是顺应节能减排的时代趋势。

目前,温差发电(TEG)技术和有机朗肯循环(ORC)技术在余热回收领域已取得了较多的研究进展。Kristiansen 等人采用 TEG 技术对船舶焚烧炉的余热回收性能进行了理论计算与系统评估^[3]; Ji 等将所设计的 TEG 装置整合到一台额定功率为 1.7~3 MW 的小型船用发动机上,并通过废热回收获得 2~4 kW 的电能^[4]。现阶段,基于 TEG 技术的船舶余热利用装置转换效率不高且船舶余热利用量有限。Huang 等在汽车尾气余热回收研究的基础上,针对船舶余热特点及其换热瓶颈,设计了基于多种船舶余热的热管-温差发电(HP-TEG)装置,并开展了仿真模拟及实验研究^[5-14]; Girgin 等选择了 7 种工质开展实验性能研究,最终提出一种在不同热负荷下均可获得高输出性能的 ORC 系统^[15]; Shu 等建立了具有 14 种流体作为工质的 ORC 系统的动力学数学模型,并比较了它们的动态响应特性^[16]。目前,基于 ORC 的船舶余热利用存在有机工质在高温下易分解、难以利用多温度梯度余热而导致大量余热浪费等问题。Miller 等首先提出了一种将 TEG 和 ORC 相结合的系统,之后进行了理论建模和研究,在该系统中,高温烟气可以先通过 TEG 单元,在发电的同时实现温降,后进入蒸发器中预热 ORC 工质,实现废热的充分利用,不过后续研究并无实验支撑^[17-18]; Qiu 等提出一种微型热电联产

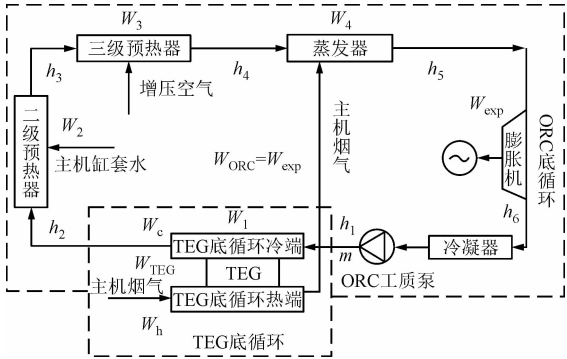
(micro-CHP)系统,建立 TEG 和 ORC 的集成模型,通过实验验证其中 TEG 单元的规律,但没有对 TEG 和 ORC 相结合的系统性能开展实验研究^[19]; Shu 等在面向汽车尾气余热回收的 ORC 系统中,引入 TEG 单元作为烟气预降温与发电性能的补充,并开展了不同临界条件下联合系统性能的理论研究和数值模拟,但没有实验研究^[20-21]。

船舶余热具有温度梯度大、可回收体量多、性质不同等特点,为弥补传统余热利用方式的局限,本文在前人研究^[5-14,22-25]的基础上,提出了一种基于 TEG-ORC 联合循环的船舶余热梯级利用系统。

1 理论模型

1.1 TEG-ORC 联合循环的热力学模型

TEG-ORC 联合循环系统的基本原理如图 1 所示。



W_1 —工质在一级预热后的余热利用功率; W_2 —工质在二级预热器中的吸热功率; W_3 —工质在三级预热器中的吸热功率; W_4 —工质在蒸发器内的吸热功率; h_1 、 h_2 —工质经温差发电底循环冷端预热前、后的焓; h_3 —工质经二级预热器预热后的焓; h_4 —工质经三级预热器预热后的焓; h_5 —饱和蒸气的焓; h_6 —膨胀后乏汽的焓;
 W_c —温差发电片冷端的放热功率; W_h —热端的吸收功率;
 W_{TEG} —温差发电系统的输出功率; W_{exp} —膨胀机的输出功率;
 W_{ORC} —ORC 底循环的输出功率; m —工质流量。

图 1 TEG-ORC 联合循环系统的基本原理

根据 Seeback 效应原理, W_c 与 W_h 可表示为

$$W_c = nq_c =$$

$$n[\alpha_{PN} IT_{ORC} + K_{PN}(T_h - T_{ORC}) + 0.5 I^2 R_{PN}] \quad (1)$$

$$W_h = nq_h =$$

$$n[\alpha_{PN} IT_h + K_{PN}(T_h - T_{ORC}) - 0.5 I^2 R_{PN}] \quad (2)$$

式中: n 为 P&N 对数; α_{PN} 为 P&N 结塞贝克系数, V/K; q_c 为单位时间内一对 P&N 结冷端放出的热量, W; q_h 为单位时间内一对 P&N 结热端吸收的热量, W; T_{ORC} 为 ORC 工质的温度, K; T_h 为温差发电片热端温度, K; K_{PN} 为 P&N 结热导率, W/(m · K); I 为回路电流, A; R_{PN} 为一对 P&N 结内电阻, Ω 。

在忽略散热损失的情况下, 最终可得温差发电系统的输出功率 W_{TEG} 及转换效率 η_l 为

$$W_{TEG} = W_h - W_c \quad (3)$$

$$\eta_l = 1 - W_c/W_h \quad (4)$$

(1) 温差发电底循环冷端。工质在温差发电底循环冷端实现第一级预热, 其余热利用功率

$$W_1 = m(h_2 - h_1) \quad (5)$$

(2) 二级预热器(主机缸套水预热器)。工质在二级预热器中由主机缸套水为其进行预热, 其吸热功率

$$W_2 = m(h_3 - h_2) \quad (6)$$

(3) 三级预热器(增压空气预热器)。工质在三级预热器中由增压空气为其进行预热, 其吸热功率

$$W_3 = m(h_4 - h_3) \quad (7)$$

(4) 蒸发器。工质在蒸发器内先定压吸热成为饱和液态, 再定温吸热成为饱和气态, 其吸热功率

$$W_4 = m(h_5 - h_4) \quad (8)$$

(5) 膨胀机。工质蒸气在膨胀机内膨胀做功, 膨胀机的输出功率

$$W_{exp} = m(h_6 - h_5) \quad (9)$$

ORC 底循环的输出功率

$$W_{ORC} = W_{exp} \quad (10)$$

ORC 底循环的热效率

$$\eta_2 = W_{exp}/(W_1 + W_2 + W_3 + W_4) \quad (11)$$

TEG-ORC 联合循环系统的总输出功率

$$W_s = W_{TEG} + W_{ORC} \quad (12)$$

TEG-ORC 联合循环系统的总余热利用功率

$$W_t = W_h + W_2 + W_3 + W_4 \quad (13)$$

TEG-ORC 联合循环系统热效率

$$\eta = W_s/W_t =$$

$$(W_{TEG} + W_{ORC})/(W_h + W_2 + W_3 + W_4) \quad (14)$$

1.2 TEG-ORC 联合循环的成本模型

ORC 系统的发电成本(C)表示如下^[25-28]

$$C = (C_{ORC} C_{RF} + C_{pl})/(W_{net} t_{op}) \quad (15)$$

式中: C_{ORC} 为系统设备投资成本; C_{pl} 为系统运行维护费用; t_{op} 为系统年运行时间; C_{RF} 为资金回收系数, 计算公式为

$$C_{RF} = l(1+l)^{T_{pl}}/[(1+l)^{T_{pl}} - 1] \quad (16)$$

其中, l 为贷款年利率, T_{pl} 为系统运行年限。

设备其主要包含二级预热器、三级预热器、蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵, 投资成本为

$$\lg C_p = K_1 + K_2 \lg Z + K_3 (\lg Z)^2 \quad (17)$$

$$C_{BM} = C_p (B_1 + B_2 F_M F_p) \quad (18)$$

式中: C_p 为设备基本费用; K_1 、 K_2 、 K_3 均为费用修正系数; Z 为换热器的总换热量; C_{BM} 为考虑材料和压力的设备修正费用; B_1 、 B_2 、 F_M 和 F_p 均为费用修正系数, 其中

$$\lg F_p = C_1 + C_2 \lg P + C_3 (\lg P)^2 \quad (19)$$

P 为 ORC 工质的蒸发压力, kPa。设备投资成本为

$$C_{ORC} = C_{BM,2} + C_{BM,3} + C_{BM,eva} + C_{BM,exp} + C_{BM,cond} + C_{BM,pump} \quad (20)$$

式中: $C_{BM,2}$ 、 $C_{BM,3}$ 、 $C_{BM,eva}$ 、 $C_{BM,exp}$ 、 $C_{BM,cond}$ 、 $C_{BM,pump}$ 分别为二级预热器、三级预热器、蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵的实际费用。

由于目前没有较为成熟的经济性模型, 同时考虑到 TEG 成本相对较低且对后期维护需求较小, 因此在对 TEG 成本进行计算时, 仅考虑其烟气管路装置及温差发电片这两部分费用, 则温差发电的热经济性模型表示为

$$C_{TEG} = (C_{pipe} + C_{TEM})/(P_{TEG} t_{op}) \quad (21)$$

式中: C_{TEG} 为温差发电装置每千瓦时的发电成本; C_{pipe} 为烟气管路装置的成本; C_{TEM} 为温差发电片的总成本; P_{TEG} 为温差发电的总输出功率。

在计算 C_{pipe} 时将烟气管路看成一个换热器单元, 采用与 ORC 换热器相同的计算方法, 最终得到烟气管路成本

$$C_{pipe} = C_{BM} \quad (22)$$

$$C_{TEM} = NC_{TEG} \quad (23)$$

式中: N 和 C_{TEG} 分别为温差发电片的数量和单价。

2 实验设计

基于 TEG-ORC 联合循环的船舶余热梯级利用装置的系统原理图如图 2 所示。

2.1 系统组成

在 TEG 底循环中, 为了克服其底循环冷热端

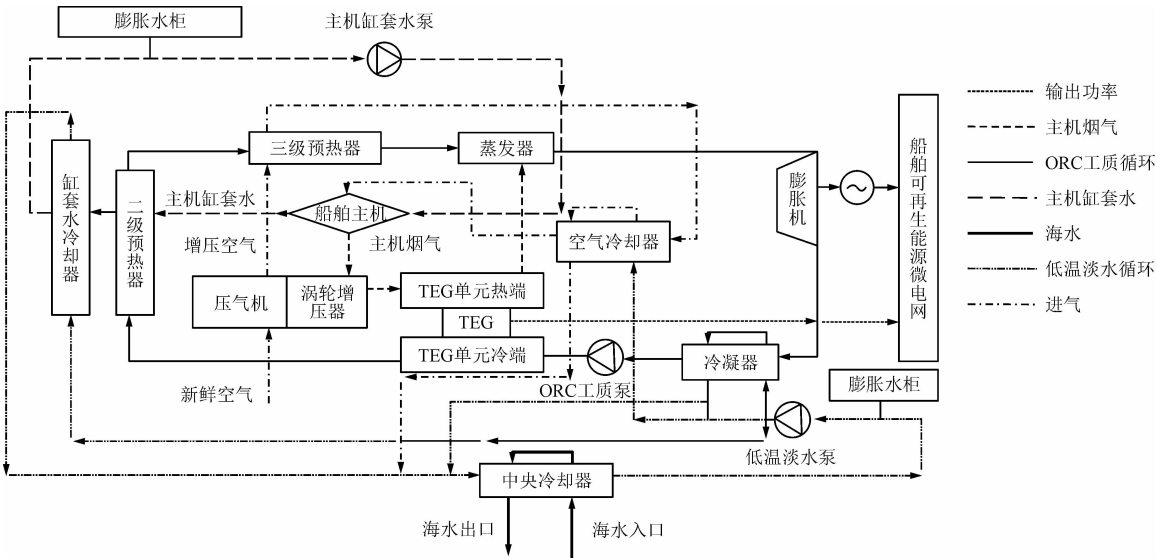


图 2 基于 TEG-ORC 联合循环的船舶余热梯级利用装置的系统原理图

换热瓶颈,设计了热管作为强化换热手段。当主机烟气流过 TEG 底循环时,废热到达热管蒸发段,经管内工质相变传热后热量传递到冷凝段;冷凝段作为 TEG 装置的热端,实现主机烟气余热的第一次利用。在实现温差发电的同时,有机工质作为冷源又借助烟气余热实现第一级预热,烟气温度降低,保证了 ORC 底循环余热利用的安全性。

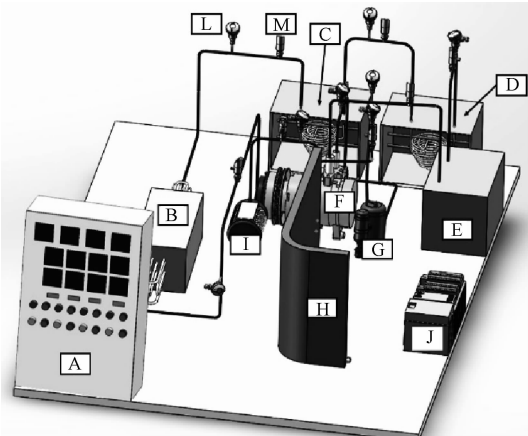
在 ORC 底循环中,有机工质在 TEG 单元冷端实现第一级预热后,利用主机缸套水余热实现第二级预热;然后,进入增压空气余热换热器,在降低增压空气温度的同时,实现第三级预热;接着,主机烟气剩余可用余热使有机工质在蒸发器出口达到最佳温度,使发电机输出功率达到最大;做功后的乏汽到达冷凝器,有机工质在其中冷却成液体,再次作为冷却介质返回 TEG 单元冷端,完成循环。

本文 TEG-ORC 联合循环的创新性和先进性在于:

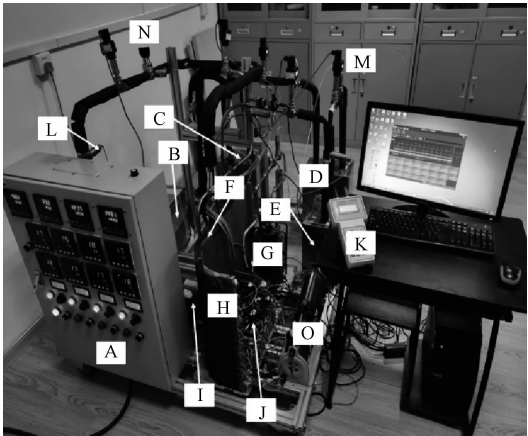
- (1)该联合循环系统是面向船舶多种余热诸如主机烟气、主机缸套水、增压空气等余热进行的梯级综合利用,适合船舶余热体量大且种类多的特点,有较高的研究价值;
- (2)相对 TEG、ORC 等单一余热回收技术,该联合循环系统不仅扩大了余热回收种类和余热利用的温度区间,而且提升了余热利用量和利用率;
- (3)该联合循环系统可实现主机烟气余热的梯级利用,在提升余热利用量的同时,更好地确保 ORC 底循环运行的稳定性和安全性。

2.2 实验设置

图 3 为基于船舶余热梯级利用的 TEG-ORC 联



(a)联合循环系统设计方案



(b)联合循环实验装置

A—电路控制单元;B—模拟烟气加热单元;C—缸套水二级预热单元;D—增压空气三级预热单元;E—蒸发器单元;F—小型涡轮膨胀机;G—工质罐;H—冷凝器;I—工质泵;J—数据监测与采集单元;K—流量传感器;L—温度传感器;M—压力传感器;N—背压阀;O—滑动变阻器。

图 3 TEG-ORC 联合循环实验系统

合循环实验系统,由 TEG 单元、ORC 发电单元、预热器单元、数据监测采集单元、控制单元 5 个部分组成。其中,TEG 单元包括模拟烟气加热单元、冷却单元、负载电路、控制电路等;ORC 发电单元包括蒸发器、小型涡旋膨胀机、冷凝器、工质泵、储液罐、控制电路等;预热器单元包括缸套水换热器、增压空气预热器、控制电路等;数据监测采集单元以及控制单元主要包括电路控制单元、压力传感器、温度传感器、热电偶、数据采集装置、滑动变阻器等。为保证实验数据的准确性,热电转换单元、各级预热器、实验管路等均使用保温材料用于保温与隔热。

本文选取 R22 作为 ORC 底循环工质,并将一台 R22 为工质的小型涡旋压缩机改装为联合循环系统的膨胀机。涡旋压缩机原有的针对压缩过程所做的外形设计,会使其改装为膨胀机后的效率下降。但由涡旋压缩机改装而成的膨胀机使用时的工作效率是可以接受的,而效率不高的主要原因是不能满足作为膨胀机要求的内置体积比。通过对涡旋膨胀机的 CFD 模拟可知,即使不对外形和内部结构作任何改变,其也可以用作涡旋式膨胀机^[29-30]。

3 结果与分析

将 TEG 底循环对主机烟气余热利用量 Q_{TEG} 与 ORC 底循环对主机烟气利用量 Q_{ORC} 的比 $Q_{\text{TEG}}/Q_{\text{ORC}}$ 定义为 TEG/ORC 底循环比,以 Γ 表示。保持 ORC 底循环工质流量及蒸发压力为 0.9 MPa 不变,通过改变 TEG 底循环规模,实现 TEG/ORC 底循环比的改变。TEG 底循环规模可变范围为 2、3 和 4 片,经实验计算,其对应的 TEG/ORC 底循环比分别为 0.369、0.508、0.615。

通过改变 TEG/ORC 底循环比,得到不同工况下 TEG 底循环和 ORC 底循环的输出功率、各级预热器的余热利用功率;通过工质在各级预热单元温度、压力的变化情况,计算得到热效率、主机烟气余热利用量、发电成本等主要性能参数。

不同底循环比工况下系统的余热利用功率如图 4 所示。由图 4 可知,在 3 种 Γ 值工况下,ORC 底循环中蒸发器的余热利用功率最大,这与 ORC 输出功率较高的实验结果相符;同时,其余热利用功率保持不变,这是因为考虑到在实际船舶余热利用中,缸套水余热和增压空气余热存量很大,所以在实验中,通过调整二级预热器和三级预热器功率,保证了不同 Γ 值工况下有机工质进入 ORC 底循环蒸发器前都达到相同的设定温度。这种调整也利于 ORC

底循环蒸发器余热利用功率的稳定以及余热利用量的最优。

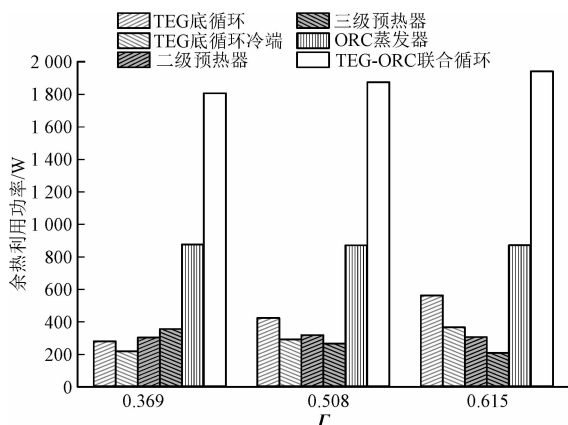


图4 不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的余热利用功率

实验中,TEG 底循环的冷端余热利用功率随着 Γ 的增大而增加,意味着工质在 TEG 底循环出口的温度升高,降低了二级预热器和三级预热器余热利用功率并使系统余热利用功率小幅上升。在 TEG 底循环规模为 4 片,即 $\Gamma=0.615$ 时,TEG 底循环加热功率、TEG 底循环冷端、二级预热器、三级预热器、ORC 蒸发器底循环的余热利用功率及系统总余热利用功率分别为 560.0、366.24、304.08、204.96、870.80、1 939.84 W。

图 5 为不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的输出功率及其发电成本。由图可知,在 3 种 Γ 值工况下,ORC 底循环的输出功率和发电成本均高于 TEG 底循环;由于本文中 Γ 值的改变主要通过改变 TEG 底循环发电片数量来实现,因此 TEG 底循环的输出功率和发电成本波动较 ORC 底循环明显。实验中,随着 Γ 值增大,TEG 底循环输出功率随之增大,与稳定不变的 ORC 底循环输出功率叠加后,

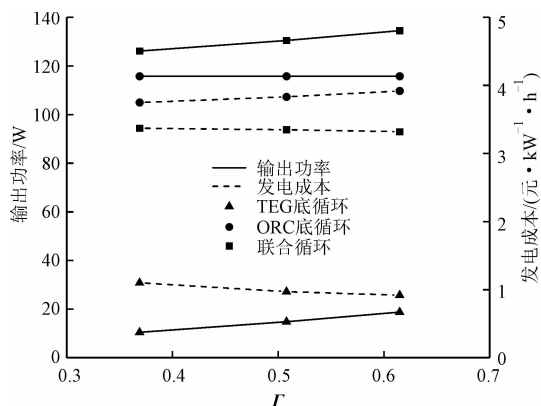


图5 不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的输出功率和发电成本

TEG-ORC 联合循环实验系统的总输出功率有所提升;TEG 底循环发电成本随着 Γ 的增加略有降低,而 ORC 底循环发电成本略微增加,综合影响,联合循环系统发电成本呈降低趋势。在 $\Gamma=0.615$ 时,TEG 底循环发电成本为 0.92 元/(kW·h),ORC 底循环发电成本为 3.92 元/(kW·h),联合循环系统发电成本为 3.32 元/(kW·h)。

由模拟研究可知^[26],本实验中部分系统参数并未处于最佳工况,如 TEG 底循环规模、ORC 工质蒸发压力等,它们在影响输出功率的同时间接导致发电成本偏高。虽然实船应用规模的发电成本较难通过实验得到,但通过联合循环理论模型可知,实船应用中热电材料成本、换热器成本的降低,会使其发电成本在多数工况下低于实验所得的发电成本。因此,将模拟结果与实验数据比较,利用实验数据修正成本模型中的设备费用修正系数、压力修正系数、换热器的换热系数等,可以更准确地评估实船发电成本。

修正后不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统输出功率和热效率的变化如图 6 所示。由图可知,在 3 种工况下,ORC 底循环的输出功率和热效率均远高于 TEG 底循环。实验中,随着 Γ 值增大,TEG 底循环余热利用功率提升,输出功率增大,但由于 TEG 底循环余热利用功率的波动较输出功率更大,因此热效率呈现下降趋势;ORC 底循环输出功率和余热利用功率保持恒定,故热效率不变;联合循环系统总输出功率逐渐增大,且热效率大于各底循环的热效率,这与联合循环理论模型相符。TEG-ORC 联合循环将 TEG 单元冷端散热用作 ORC 工质一级预热,在减少余热浪费的同时,也提升了整体的热效率。随着 Γ 增大,TEG 底循环所占比例逐渐增高但热效率不断降低,故联合循环系统热效率呈现下

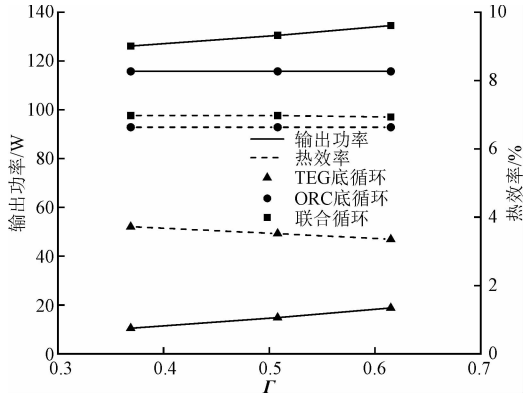


图 6 不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的输出功率和热效率(修正后)

降趋势。在 $\Gamma=0.615$ 时,TEG 底循环、ORC 底循环以及联合循环输出功率分别为 18.76 、 115.74 、 134.50 W,热效率分别为 3.35% 、 6.63% 、 6.93% 。

不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的发电成本如图 7 所示。由图 7 可知,在 3 种 Γ 值工况下,ORC 底循环发电成本最高,且占系统发电成本比例较大,由此可见,ORC 底循环对系统发电成本影响较大。实验中,随着 Γ 值逐渐增大,TEG 底循环发电成本逐渐降低,ORC 底循环发电成本逐渐增高,联合循环系统发电成本呈降低趋势。由图 7 可看出,虽然 ORC 底循环规模不变,但 ORC 底循环发电成本仍略有增加,其原因参照公式(15):ORC 底循环发电成本模型中涵盖了二级预热器和三级预热器成本,不同底循环比工况下,不同的 TEG 烟气余热利用功率影响了二级和三级预热器的余热利用功率,导致发电成本增加。

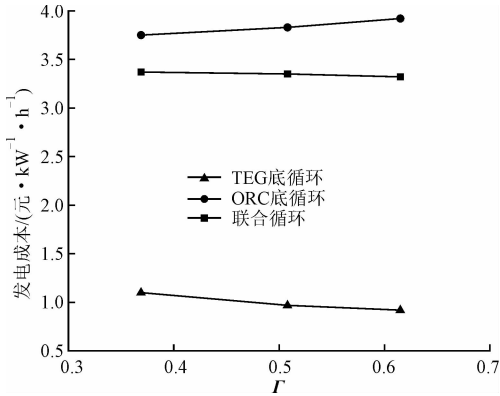


图 7 不同 TEG/ORC 底循环比工况下系统的发电成本

图 8 为 3 个 TEG/ORC 底循环比工况下主机烟气余热利用量和烟气温降的变化趋势。由图 8 可知,在 3 种 Γ 值工况下,主机烟气在经过 ORC 底循环后的温降远高于 TEG 底循环,可见,ORC 底循环对主机烟气余热利用能力远高于 TEG 底循环。随着 Γ 值逐渐增大,ORC 底循环余热利用量保持恒

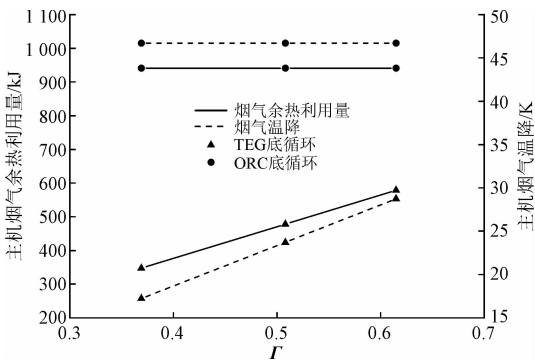


图 8 不同 TEG/ORC 底循环比工况下主机烟气余热利用量和烟气温降

定,这与图4中ORC底循环的余热利用功率保持不变相符,因此主机烟气温降也保持恒定。同时,TEG底循环利用主机烟气余热的能力随着 Γ 的增加而增强,经过TEG单元后的烟气温降也因此逐渐增大。在 Γ 为0.615时,TEG和ORC底循环余热利用量分别为579.04 kJ和940.94 kJ,对应的主机烟气温降分别为28.74 K和46.70 K。

图9为3个TEG/ORC底循环比工况下主机烟气余热利用率。由图9可知,随着 Γ 值逐渐增大,TEG-ORC联合循环实验系统对主机烟气余热的利用率同步提高,在 $\Gamma=0.615$ 时,主机烟气余热利用率达到62.87%。本文中底循环比 Γ 的变化范围有限,实际上主机烟气余热利用率仍有较大提升空间。结合仿真及模拟研究可知^[26],在工质流量为0.046 kg/s、蒸发压力2.0~3.0 MPa时,主机烟气余热利用率与系统输出功率均随 Γ 的增大而提高。

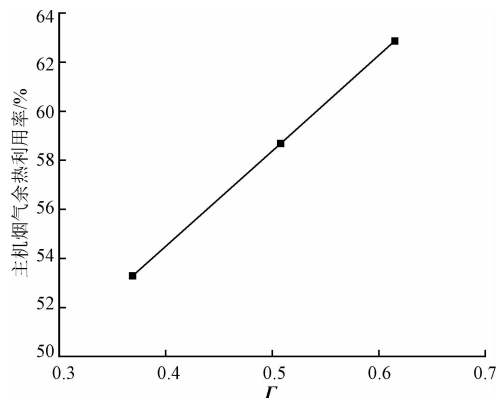


图9 不同TEG/ORC底循环比工况下主机烟气余热利用率

在以仿真模拟结果为依据的实验基础上,完成了3种底循环比工况的性能研究,实验结果与模拟结果基本一致。下一步,将升级现有实验装置,探索更多工况下不同底循环比对系统性能的影响,在更大范围内确定是否存在最优底循环比。

4 结 论

本文设计了一种TEG-ORC联合循环系统,用于实现船舶主机烟气、主机缸套水、增压空气等多种余热的梯级利用。实验结果表明:在ORC底循环蒸发压力不变及TEG/ORC底循环比小于0.615的工况下,随TEG/ORC底循环比的增加,系统的输出功率增大,发电成本和热效率减少;此外,联合循环系统更好地利用了TEG单元冷端散热,提升了系统余热利用性能,使其热效率高于各底循环且

发电成本低于各底循环;在底循环比为0.615时,联合系统输出功率为134.50 W,热效率为6.93%,发电成本为3.32元/(kW·h)。

参考文献:

- [1] CAI Yao, LIU Zhengjiang, KOBAYASHI E. Improving concordance of expert judgment in formal safety assessment [J]. Navigation, 2010, 176(3): 50.
- [2] 梅磊. 船舶柴油机新型余热回收利用系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 1-2.
- [3] KRISTIANSEN N R, SNYDER G J, NIELSEN H K, et al. Waste heat recovery from a marine waste incinerator using a thermoelectric generator [J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(6): 1024-1029.
- [4] JI D X, TSENG K J, WEI Z B, et al. A simulation study on a thermoelectric generator for waste heat recovery from a marine engine [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(5): 2908-2914.
- [5] HUANG Kuo, YAN Yuying, LI Bo, et al. A novel design of thermoelectric generator for automotive waste heat recovery [J]. Automotive Innovation, 2018, 1(1): 54-61.
- [6] HUANG Kuo, LI Bo, YAN Yuying, et al. A comprehensive study on a novel concentric cylindrical thermoelectric power generation system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 501-510.
- [7] LIU Changxin, PAN Xinxiang, YAN Yuying, et al. An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(2): 271-281.
- [8] LIU Changxin, LI Weizhong. An experimental study of a novel prototype for thermoelectric power generation from vehicle exhaust [J]. Distributed Generation & Alternative Energy Journal, 2014, 29(2): 8-23.
- [9] LIU Changxin, LI Weizhong. An experimental study of a two-stage thermoelectric generator using heat pipe in vehicle exhaust [J]. Distributed Generation & Alternative Energy Journal, 2015, 30(1): 15-37.
- [10] ZHENG Xiaofeng, LIU Changxin, BOUKHANOUF R, et al. Experimental study of a domestic thermoelectric cogeneration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(1): 69-79.
- [11] ZHENG Xiaofeng, LIU Changxin, YAN Yuying, et al. A review of thermoelectrics research: recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 486-503.

- [12] 王慧斌,汪正洋,吕延枫,等. 船舶主机废气余热温差发电的数值模拟与试验研究 [J]. 船舶工程, 2018, 40(2): 8-11.
- WANG Huibin, WANG Zhengyang, LÜ Yanfeng, et al. Numerical simulation and experimental study on exhaust heat of ship diesel engine based on TEG [J]. Ship Engineering, 2018, 40(2): 8-11.
- [13] 柳长昕,郑子升,吕延枫,等. 基于两级温差发电的船舶废热回收试验研究 [J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 30-3467.
- LIU Changxin, ZHENG Zisheng, LÜ Yanfeng, et al. Experimental study for vessel exhaust heat recovery based on two-stage thermoelectric generation [J]. Ship Engineering, 2017, 39(1): 30-3467.
- [14] LIU Changxin, LI Fangming, ZHAO Cong, et al. Experimental research of thermal electric power generation from ship incinerator exhaust heat [J]. IPO Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227: 022031.
- [15] GIRGIN I, EZGI C. Design and thermodynamic and thermoeconomic analysis of an Organic Rankine Cycle for naval surface ship applications [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 623-634.
- [16] SHU Guqun, WANG Xuan, TIAN Hua, et al. Scan of working fluids based on dynamic response characters for Organic Rankine Cycle using for engine waste heat recovery [J]. Energy, 2017, 133: 609-620.
- [17] MILLER E W, HENDRICKS T J, PETERSON R B. Modeling energy recovery using thermoelectric conversion integrated with an organic Rankine bottoming cycle [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(7): 1206-1213.
- [18] MILLER E W, HENDRICKS T J, WANG H, et al. Integrated dual-cycle energy recovery using thermoelectric conversion and an organic Rankine bottoming cycle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2011, 225(1): 33-43.
- [19] QIU Kuanrong, HAYDEN A C S. Integrated thermoelectric and Organic Rankine Cycles for micro-CHP systems [J]. Applied Energy, 2012, 97: 667-672.
- [20] SHU Gequn, ZHAO Jian, TIAN Hua, et al. Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on the thermoelectric generator and Organic Rankine Cycle utilizing R123 [J]. Energy, 2012, 45(1): 806-816.
- [21] SHU Gequn, ZHAO Jian, TIAN Hua, et al. Theoretical analysis of engine waste heat recovery by the combined thermo-generator and organic Rankine cycle system [C] // SAE 2012 World Congress & Exhibition. Washington DC, USA: SAE, 2012: 636-644.
- [22] 隋雨鑫. 基于热管和温差发电的船舶烟气余热回收装置设计与研究 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2017: 61-63.
- [23] 郑子升. 基于半导体温差发电的船舶余热利用实验研究 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2017: 56-59.
- [24] 吕延枫. 基于 TEG-ORC 联合循环的船舶余热利用系统数值模拟 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2018: 69-71.
- [25] 王慧斌. 基于 TEG-ORC 联合循环的船舶余热回收仿真与模拟研究 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2019: 62-64.
- [26] 李春春. 回收低温烟气余热的亚临界有机朗肯循环 (ORC) 系统多参数同步优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 12-13.
- [27] ZHANG Shengjun, WANG Huaixin, GUO Tao. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation [J]. Applied Energy, 2011, 88(8): 2740-2754.
- [28] QUOILIN S, DECLAYE S, TCHANICHE B F, et al. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14/15): 2885-2893.
- [29] EMRE O. Conversion of a scroll compressor to an expander for Organic Rankine Cycle modeling and analysis [D]. Toronto, Canada: University of Ontario. Institute of Technology, 2010: 133-136.
- [30] 美丽鱼. 将旋转压缩机作为内燃机废热回收 ORC 膨胀机的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015: 84-86.

(编辑 亢列梅)