

文章编号:1671-6833(2023)01-0065-05

ORC 系统蒸发器夹点温差的数值分析和实验研究

马新灵,王 聪,石文琪,孟祥睿,张景迪,邱宇恒,潘佳浩

(郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:有机朗肯循环(ORC)是一种高效回收余热的可靠手段。考虑蒸发器的换热面积和系统的热力性能,自定义了性能评价指标 $F(\cdot)$,在热源温度为 $105\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、蒸发器夹点温差为 $3\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,分别从工质流量和蒸发温度的角度,模拟分析了夹点温差对系统性能的影响。结果表明:系统的净输出功和热效率均随夹点温差的降低而增加,且分别在热源温度为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、夹点温差为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值 53.53 kW 和 12.21% ;一定工质流量下,热源温度为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $F(\cdot)$ 的值最小,此时最优夹点温差为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$;一定蒸发温度下, $F(\cdot)$ 的值随夹点温差的增大一直减小。在自主搭建的小型 ORC 低温余热发电试验平台上,分别研究了不同的热源流量、冷却水流量和工质流量下,蒸发器夹点温差对 ORC 系统性能的影响。结果发现:当热源流量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$,系统在较低的蒸发器夹点温差下有更好的表现,此时存在使系统性能最佳的工质流量和冷却水流量,分别为 700 kg/h 和 $3\text{ m}^3/\text{h}$ 。

关键词:蒸发器夹点温差;实验研究;热力学性能;有机朗肯循环

中图分类号:TK115 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2023.01.006

有机朗肯循环(ORC)在利用低品位热能方面有巨大的潜力^[1-2],研究蒸发器夹点温差对改善蒸发器传热效率及 ORC 系统性能具有重要意义^[3-4]。Li 等^[5]分析了热源温度、流量和夹点温差等对双蒸发压力有机朗肯循环(DPORC)系统性能的影响。发现夹点温差越大,DPORC 系统的经济性和热力学性能越好。Zhang 等^[6]对 DPORC 系统性能进行了多目标优化研究,研究表明,当夹点温差由 5 K 增至 25 K 时,系统热效率降低 $1\%\sim 2\%$ 。Sun 等^[7]对建立的碳足迹和水足迹(WF)模型进行灵敏度分析,得到的最佳蒸发温度、夹点温差和最大净输出功率分别为 $106.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $6.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 9.32 kW 。

为全面地研究夹点温差对 ORC 系统性能的影响,更多的学者采用综合评价指标进行优化分析^[8-9]。Xia 等^[10]提出了综合评价指标(CEI)来评价 ORC 系统的特性。发现当蒸发器夹点温差为 5 K ,膨胀机进口压力为 1.75 MPa 时,可获得最佳综合性能。Wang 等^[11]基于非支配排序遗传算法,选择夹点温差等为决策变量进行优化。最终获得的最优总成本和效率分别为 129.28×10^4 美元

和 13.98% 。

综上所述,为准确研究蒸发器夹点温差对 ORC 系统性能的影响,提出利用指标 $F(\cdot)$ 综合评价 ORC 系统的净输出功率和投资成本,并在自主搭建的 ORC 低温余热发电平台上进行试验研究。研究结果将为蒸发器的进一步优化以及 ORC 系统的实际应用提供参考。

1 热力学分析

蒸发器中冷热流体的传热温度沿有机工质流动方向的变化如图 1 所示。

由于有机工质在蒸发器内的温升比热源的温降大,而且有机工质从饱和液体汽化为饱和蒸气是等温过程,有机工质的过热段又很短,故在点 x 处存在传热过程的最小温差,即夹点温差(ΔT),表示为

$$\Delta T = T_x - T_3。 \quad (1)$$

根据能量守恒方程, T_x 的焓可表示为

$$h_x = h_{\text{Hi}} - \frac{\dot{m}_{\text{wf}}(h_1 - h_3)}{\dot{m}_{\text{H}}}。 \quad (2)$$

收稿日期:2022-03-16;修订日期:2022-05-19

基金项目:河南省科技攻关计划项目(162102310504);河南省高等学校重点科研项目(19A480005)

通信作者:孟祥睿(1974—),男,河南郑州人,郑州大学副教授,博士,主要从事新型制冷装置的研究与开发,E-mail:mengxr@zzu.edu.cn。

引用本文:马新灵,王聪,石文琪,等. ORC 系统蒸发器夹点温差的数值分析和实验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023,44(1):65-69. (MA X L, WANG C, SHI W Q, et al. Numerical analysis and experimental investigation of the evaporator PPTD in ORC system[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2023,44(1):65-69.)

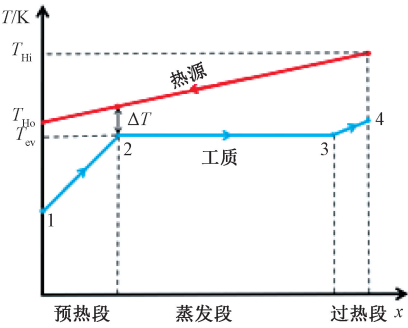


图 1 蒸发器中流体温度沿有机工质流动方向的变化
Figure 1 Variation of fluid in evaporator with the flow direction of working fluid

一方面,蒸发器的夹点温差越高,不可逆损失越大,系统的热力性能越差;另一方面,过低的蒸发器夹点温差要求更大的传热面积,导致投资成本增加。本文参照 Jankowski 等^[12]提出的加权求和法,综合考虑夹点温差对系统热力性能和经济性能的影响,定义评价指标 $F(\cdot)$ 如式(3)所示。

$$F(\cdot) = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2; \quad (3)$$

$$f_1 = \frac{A}{W_{\text{net}}}; \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{1}{\eta_{\text{cycle}}}; \quad (5)$$

$$A = \frac{Q_{\text{eva}}}{K \Delta t_m}. \quad (6)$$

式中:函数 f_1 和 f_2 分别为经济指标和系统热力性能的指标; W_{net} 为系统的净输出功率, kW; η_{cycle} 为系统的热效率; A 为蒸发器面积, m^2 ; Q_{eva} 为蒸发器内的换热量, kW; K 为蒸发器传热系数, 取 $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[13]; Δt_m 为蒸发器平均对数传热温差, K; ω_1 、 ω_2 为权重, 由 α 法^[14]来确定二者的取值, 如式(7)、(8)所示。

$$\omega_1 = \frac{f_{21} - f_{22}}{(f_{12} - f_{11}) + (f_{21} - f_{22})}; \quad (7)$$

$$\omega_2 = \frac{f_{12} - f_{11}}{(f_{12} - f_{11}) + (f_{21} - f_{22})}. \quad (8)$$

对上式进行归一化处理,得

$$f^n = \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}. \quad (9)$$

式中: f_{\max} 和 f_{\min} 分别为函数 f 的最大值和最小值。即 f_{11} 表示目标函数 f_1 的最大值; f_{12} 表示当 f_2 取最大值时目标函数 f_1 的函数值; f_{22} 表示目标函数 f_2 的最大值; f_{21} 表示当 f_1 取最大值时目标函数 f_2 的函数值。显然, $F(\cdot)$ 的值越小越好。

2 蒸发器夹点温差的模拟研究

本节以 R245fa 为工质,用 Aspen Plus 软件建立 ORC 系统模型,分别从定工质质量流量和定蒸发温度两方面优化在 $105 \sim 165 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间的热源温度下,当夹点温差在 $3 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间内变化时的系统性能。

2.1 定工质质量流量下蒸发器夹点温差的影响

图 2 为定工质流量下 5 种热源温度的 ORC 系统热力学性能随夹点温差的变化规律。

同一热源温度下,系统净输出功率和热效率都随着蒸发器夹点温差的降低而增加。因为夹点温差越小,蒸发温度(压力)越大,故工质在膨胀机中的焓降增大。由于工质吸热量的增幅小于净功率的增幅,系统热效率增大。

在同一蒸发器夹点温差下,当热源温度增大,导致膨胀机焓降和系统性能参数变大。当热源温度由 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $165 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,系统热效率在夹点温差为 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 处达到最大,对应的最大热效率为 $8.87\% \sim 12.21\%$;当夹点温差温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的最小热效率为 $4.19\% \sim 7.58\%$ 。

图 2(c)是在不同蒸发器夹点温差和热源温度下的 $F(\cdot)$ 的变化。对于给定的热源温度,当夹点温差从 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 增至 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $F(\cdot)$ 先减小后增大。对于给定的 5 种热源温度, $F(\cdot)$ 均在夹点温差为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时取得最小值。由于夹点温差增加导致蒸发器的传热平均温差增加,而蒸发器换热量基本不变,所以换热面积减小,净输出功率也会随夹点温差的增大而

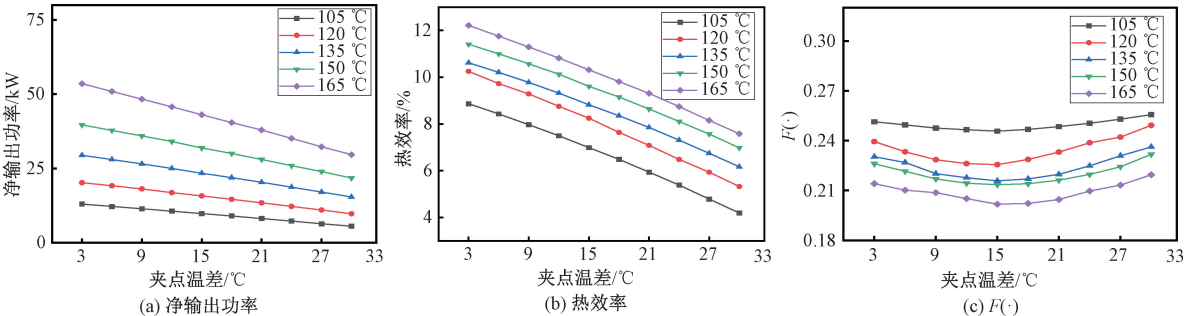


图 2 定工质流量下蒸发器夹点温差对 ORC 系统性能的影响
Figure 2 Influence of evaporator PPTD on the performance of ORC system at constant working fluid flow rate

减小。 $F(\cdot)$ 在蒸发器夹点温差较小时逐渐下降是因为换热面积减小幅度大于热效率和净输出功率减小幅度;而随着夹点温差的进一步增加,净输出功率和热效率的下降幅度逐渐大于蒸发面积下降幅度, $F(\cdot)$ 开始增加。

综上所述,可以发现在研究范围内 R245fa 适合

回收温度较高的热源。

2.2 定蒸发温度下蒸发器夹点温差的影响

定蒸发温度下 5 种热源温度的 ORC 系统热力学性能和综合评价指标随夹点温差的变化规律,如图 3 所示。

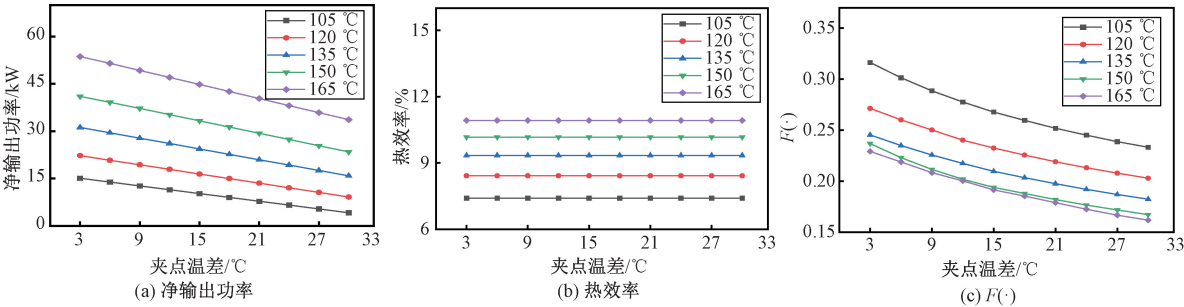


图 3 定蒸发温度下蒸发器夹点温差对 ORC 系统性能的影响

Figure 3 Influence of evaporator PPTD on the performance of ORC system at constant evaporation temperature

在同一热源温度下,随着蒸发器夹点温差的降低,系统的净输出功率增加,而热效率几乎不变。这是因为工质蒸发温度不变,故膨胀机的焓降和泵的焓升基本不变,所以热效率变化不大。

在同一夹点温差下,系统热力性能参数随热源温度的升高而增加。这是因为随着热源温度的升高,工质流量增大,净输出功率和吸热量都增加,且前者的增幅大于后者。

图 3(c)为不同蒸发器夹点温差和热源温度下 $F(\cdot)$ 的变化。同一热源温度下,当蒸发器夹点温差逐渐增加时, $F(\cdot)$ 逐步下降。由于蒸发温度一定,系统热效率基本不变,故此时指标 $F(\cdot)$ 主要和 f_1 有关。由于夹点温差增加导致换热面积减小,而净输出功率降低相对较小导致 $F(\cdot)$ 越来越小。因此在实际应用中,可以适当增加蒸发器夹点温差来降低设备的投资成本。由图 3(c)可得, $F(\cdot)$ 在夹点温差和热源温度分别为 30 °C 和 165 °C 时取得最小值 0.162。

3 实验和结果分析

本实验是在图 4 所示的以 R245fa 为工质的 3 kW ORC 发电实验平台上进行的。热源为 120 °C 的导热油,冷却水温度可视为环境温度 10 °C。通过分别改变系统的热源、工质和冷却水的流量来评估在不同蒸发器夹点温差下的系统性能。由于管道存在压损等问题,试验与仿真结果存在一定的偏差,但系统的性能趋势仍具有一定的参考意义。

设定导热油的质量流量分别为 3.0、3.5、4.0、

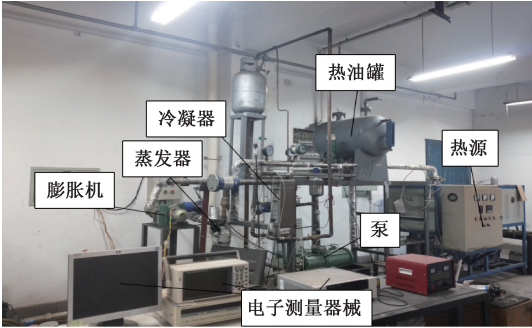


图 4 ORC 低温余热发电实验平台装置图

Figure 4 Picture of ORC low temperature waste heat power generation experimental platform

4.5、5.0 m³/h,冷却水流量分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m³/h,工质流量分别为 500、600、700、800、900 kg/h。采用 3 个变量各 5 组进行正交实验,得到 125 组实验数据。初步实验分析发现,工质流量 700 kg/h,热源流量 4 m³/h,冷却水流量 3 m³/h 分别为每组变量的最优工况,故实验分别以最优工况为基准,最终选取了 75 组实验数据进行分析。

3.1 变工质流量下夹点温差的影响

热源流量恒为 4 m³/h 时,系统热力性能随夹点温差和工质流量变化的规律如图 5 所示。

在同一工质流量下,随着冷却水流量的减少,蒸发器的夹点温差增大,工质冷凝压力即膨胀机出口压力增大。所以膨胀机进出口焓差降低,ORC 系统的热力性能参数也相应降低,该结论与之前的模拟结果一致。

在同一冷却水流量下,逐渐增大的工质流量使得蒸发器夹点温差减小,而系统焓降和热效率先升高,然后在工质流量达到 700 kg/h 后趋于平缓,即

工质流量为 700 kg/h 时,系统性能趋于稳定。当夹点温差为 35.51 ℃,冷却水流量为 3 m³/h,工质流量为 900 kg/h 时,系统净输出功率和热效率均达到最大为 2.26 kW 和 3.83%。

3.2 变热源流量下夹点温差的影响

冷却水流量恒为 3 m³/h 时,系统热力性能随夹点温差和热源流量变化的规律如图 6 所示。在同一热源流量下,工质流量减小导致夹点温差增大,系统的焓降和净输出功率降低,而吸热量变化相对较小,所以热效率也有所降低。

在同一工质流量下,随着热源流量的升高,夹点温差逐渐增大,系统的各性能参数先升高后降低,且都在热源流量为 4 m³/h 时达到最大。分析认为,当热源流量小于 4 m³/h,随着热源流量的提高,蒸发器出口的温度压力增大,透平进出口的焓降增大,输

出功率和热效率增大;当流量大于 4 m³/h 后,热源供热量充足,蒸发器出口的温度和压力基本保持不变,但工质过热度增加,进而导致做功能力下降,性能降低。

3.3 变冷却水流量下夹点温差的影响

工质流量恒为 700 kg/h 时,系统热力性能随夹点温差和冷却水流量变化的规律如图 7 所示。

在同一冷却水流量下,随着热源流量增大夹点温差增大,系统热力学性能参数均先增大后减小,且在热源流量 4 m³/h 处最大。净输出功率和热效率的最大值分别为 1.98 kW 和 3.75%,此时冷却水流量为 3 m³/h,夹点温差为 44.24 ℃。

在同一热源流量下,蒸发器夹点温差受逐渐增加的冷却水流量影响而下降,导致性能参数随着冷凝器的冷凝效果的增加而逐渐增加。

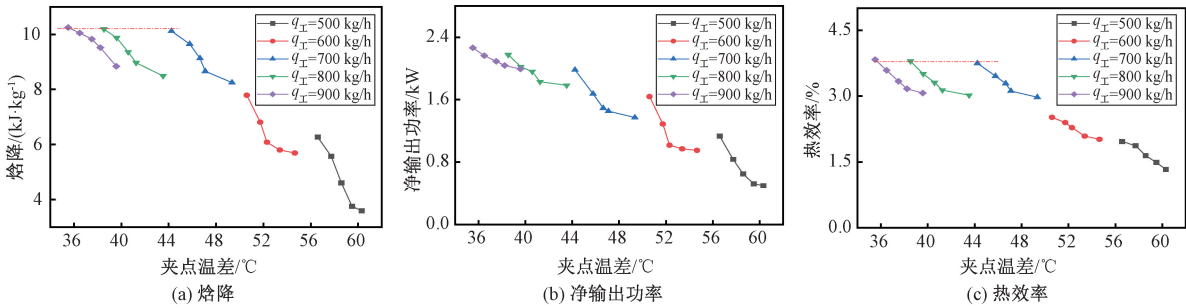


图 5 不同工质流量下蒸发器夹点温差对 ORC 系统的影响

Figure 5 Effect of evaporator PPTD on ORC system at different working fluid flow rate

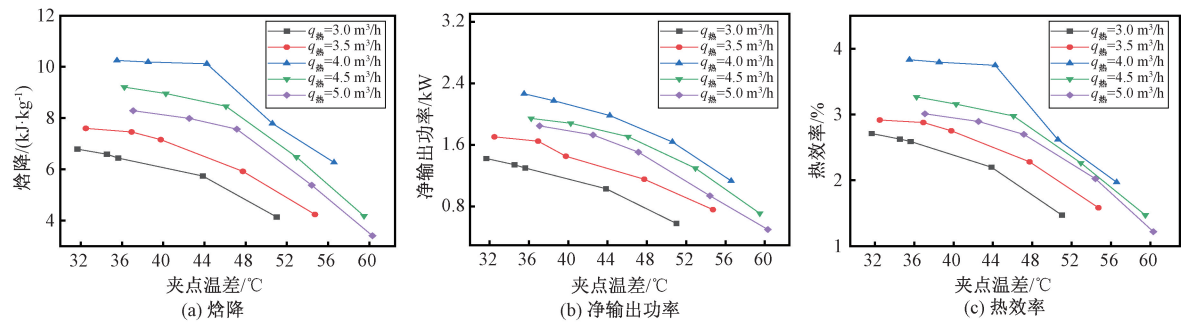


图 6 不同热源流量下蒸发器夹点温差对 ORC 系统的影响

Figure 6 Effect of evaporator PPTD on ORC system at different heat source flow rate

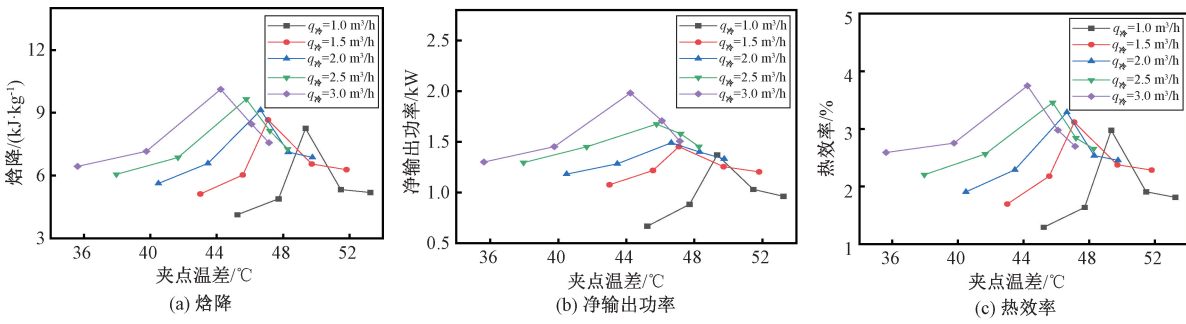


图 7 不同冷却水流量下蒸发器夹点温差对 ORC 系统的影响

Figure 7 Effect of evaporator PPTD on ORC system at different Cooling water flow rate

4 结论

(1)利用综合指标 $F(\cdot)$ 从 ORC 系统的经济性与热力学能两方面评价了蒸发器夹点温差对 ORC 系统热力学性能的影响。

(2)分别研究了定工质质量流量和定蒸发温度下热源温度 (105 ~ 165 ℃) 和蒸发器夹点温差 (3 ~ 30 ℃) 对 ORC 系统性能的影响。不论是从工质流量的角度还是从蒸发温度角度考虑,净输出功率、热效率均随蒸发器夹点温差的增大而减小,当热源温度为 165 ℃,夹点温差为 3 ℃时,最大净输出功率和热效率分别为 53.53 kW,12.21%。而工质流量一定时,不同蒸发温度下存在最优夹点温差,当热源温度 165 ℃,最优夹点温差 15 ℃时, $F(\cdot)$ 最小;而蒸发温度一定时,不同工质流量下, $F(\cdot)$ 的值随夹点温差的增大逐渐减小,热源温度 165 ℃,夹点温差最大 30 ℃时, $F(\cdot)$ 最小。

(3)在自主搭建的 ORC 发电平台上研究了不同有机工质流量、热源流量和冷却水流量下,蒸发器夹点温差对 ORC 系统膨胀机的焓降、系统的净输出功率和热效率影响。总体来说,上述参数分别为 700 kg/h、4 m³/h、3 m³/h 时,系统的性能较优,此时蒸发器的夹点温差为 44.24 ℃,系统的净输出功率、热效率分别为 1.98 kW 和 3.75%。

参考文献:

[1] 马新灵,连麒飞,雷萌,等. 混合工质的选择对 ORC 系统性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(6): 61-67.
MA X L, LIAN Q F, LEI M, et al. Impacts of selection of zeotropic mixture on performance of ORC system[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2021, 42(6): 61-67.

[2] 魏新利,李明辉,马新灵,等. 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 73-76.
WEI X L, LI M H, MA X L, et al. Experimental investigation and performance analysis of organic Rankine cycle system[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2016, 37(2): 73-76.

[3] LI Y R, WANG J N, DU M T. Influence of coupled pinch point temperature difference and evaporation temperature on performance of organic Rankine cycle[J]. Energy, 2012, 42(1): 503-509.

[4] SARKAR J. Generalized pinch point design method of subcritical-supercritical organic Rankine cycle for maximum heat recovery[J]. Energy, 2018, 143: 141-150.

[5] LI J, YANG Z, HU S Z, et al. Thermo-economic analyses and evaluations of small-scale dual-pressure evaporation organic Rankine cycle system using pure fluids[J]. Energy, 2020, 206: 118217.

[6] ZHANG J N, QIN K, LI D J, et al. Potential of organic Rankine cycles for unmanned underwater vehicles[J]. Energy, 2020, 192: 116559.

[7] SUN Z, LIU C, XU X X, et al. Comparative carbon and water footprint analysis and optimization of Organic Rankine Cycle[J]. Applied thermal engineering, 2019, 158: 113769.

[8] MAGO P J, LUCK R. Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery from a microturbine using organic Rankine cycles[J]. International journal of energy research, 2013, 37(8): 888-898.

[9] 魏新利,潘惠华,刘宏. 换热网络优化设计进展[J]. 郑州工业大学学报, 1998, 19(增刊 1): 77-82.
WEI X L, PAN H H, LIU H. Development of optimal design for heat exchanger network[J]. Journal of Zhengzhou university of technology, 1998, 19(S1): 77-82.

[10] XIA X X, WANG Z Q, HU Y H, et al. A novel comprehensive evaluation methodology of organic Rankine cycle for parameters design and working fluid selection[J]. Applied thermal engineering, 2018, 143: 283-292.

[11] WANG J F, YAN Z Q, WANG M, et al. Multi-objective optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm[J]. Energy conversion and management, 2013, 71: 146-158.

[12] JANKOWSKI M, BORSUKIEWICZ A, SZOPIK-DEPCZYŃSKA K, et al. Determination of an optimal pinch point temperature difference interval in ORC power plant using multi-objective approach[J]. Journal of cleaner production, 2019, 217: 798-807.

[13] WANG J S, DIAO M Z, YUE K H. Optimization on pinch point temperature difference of ORC system based on AHP-Entropy method[J]. Energy, 2017, 141: 97-107.

[14] 唐焕文. 实用数学规划导论[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1986.
TANG H W. Introduction to applied mathematical programming[M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Press, 1986.

Measuring Vertical Error of the Rotating Laser

ZHANG Weidong¹, ZHAO Fengxia², SU Qinglei¹, CHENG Pengli¹, NIE Jinling¹

(1. Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to test the vertical accuracy of the vertical level plane about the rotating laser, the vertical level error of the laser level was analyzed. Using the sine and cosine theorems of spherical triangles, the calculation formula of total deviation of the rotating axis from the axis of the rotating laser was deduced. The mathematical model of the deflective deviation with the total deviation of the rotating axis from the axis was established. A special test device with double light pipes based on horizontal axis symmetry was built, and a scheme was designed to first measure the error component separately and then synthesize the vertical error, and experiments were carried out to verify it. The results showed that the maximum difference was no more than 6.3" obtained in our scheme in different instrument poses, which was better than the maximum difference of 16.5" in the traditional scheme, which proved that the designed scheme was technically feasible, and the mathematical model was accurate and reliable.

Keywords: rotating laser; vertical error; deflective deviation; total deviation of the rotating axis from the axis; spherical triangle

(上接第 69 页)

Numerical Analysis and Experimental Investigation of the Evaporator PPTD in ORC System

MA Xinling, WANG Cong, SHI Wenqi, MENG Xiangrui, ZHANG Jingdi, QIU Yuheng, PAN Jiahao

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Organic Rankine Cycle (ORC), a reliable way in recovering waste heat efficiently was examined in this study. Firstly, considering the heat exchange area of the evaporator and the thermodynamic performance of the system, the performance evaluation index $F(\cdot)$ was defined. When the heat source temperature was 105–165 °C and the evaporator pinch point temperature difference(PPTD) was 3–30 °C, the influence of the evaporator PPTD on the system performance was simulated and analyzed from the aspects of working fluid flow rate and evaporation temperature, respectively. The results showed that the net output work and thermal efficiency of the system increased with the decrease of PPTD, and respectively reached the maximum value of 53.53 kW and 12.21% when the heat source temperature was 165 °C and the PPTD was 3 °C. At a certain working fluid flow rate and the heat source temperature was 165 °C, the $F(\cdot)$ was the minimum, where the optimal PPTD was 15 °C. At a certain evaporation temperature, the $F(\cdot)$ decreased with the increase of PPTD. Then, on the self-built small-scale ORC low-temperature waste heat power generation test platform, the influence of the evaporator PPTD on the performance of ORC system at different heat source flow rate, cooling water flow rate and working fluid flow rate was studied. It is found that when the heat source flow rate was 4 m³/h, the system performed better with a lower PPTD, meanwhile the working fluid flow rate of 700 kg/h and cooling water flow rate of 3 m³/h made the system performance the best.

Keywords: evaporator pinch point temperature difference; experimental investigation; comprehensive performance; organic Rankine cycle