

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208168

基于 NSGA-II 算法的变温度热源有机朗肯循环系统性能分析及工质选择

马新灵, 邱宇恒, 孟祥睿, 潘佳浩, 王双全
(郑州大学机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

[摘要] 针对 120~150 °C 烟气余热, 建立亚临界有机朗肯循环系统的数学模型。首先以 R245fa 为例, 在不同热源温度下对系统进行了热力性能和经济性能分析; 其次选取 6 种纯工质, 基于 NSGA-II 算法对系统进行了多目标优化研究; 最后通过 TOPSIS 法和灰色关联分析对不同热源温度下的系统进行了工质选择和性能分析。结果表明: 在研究温度范围内, 过热度 and 蒸发器夹点温差的升高均不利于提升系统性能; 不同热源温度下的最佳工质不同, 热源温度为 120 °C 时, R601 的热力性能最优, R245fa 的经济性最优, R1233zd 的综合性能最优; 热源温度的升高有利于提升系统的经济性能, 各工质的最佳蒸发温度随着热源温度的升高而升高。灰色关联分析表明, 6 种工质的综合性能均随着热源温度升高有所提升。

[关键词] 有机朗肯循环; 余热回收; 热力学分析; NSGA-II 算法; 多目标优化

[引用本文格式] 马新灵, 邱宇恒, 孟祥睿, 等. 基于 NSGA-II 算法的变温度热源有机朗肯循环系统性能分析及工质选择[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 82-89. MA Xinling, QIU Yuheng, MENG Xiangrui, et al. Performance analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle system with variable temperature heat source based on NSGA-II algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 82-89.

Performance analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle system with variable temperature heat source based on NSGA-II algorithm

MA Xinling, QIU Yuheng, MENG Xiangrui, PAN Jiahao, WANG Shuangquan
(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A mathematical model of subcritical organic Rankine cycle (ORC) system is established for the flue gas waste heat of 120~150 °C. Firstly, the thermal performance and economic performance of the system are analyzed at different heat source temperatures by taking R245fa as an example. Then, a multi-objective optimization study is conducted for six pure working fluids based on NSGA-II algorithm. At last, working fluid selection and performance analysis of the ORC system with various heat source temperatures are carried out by TOPSIS method and gray correlation analysis. The results show that, in the temperature range of this study, the increase of superheat degree and evaporator pinch point temperature difference is not conducive to improve the system performance. The optimal working fluids are varied at different heat source temperatures, when the heat source temperature is 120 °C, R601 has the best thermal performance, R245fa has the best economic performance and R1233zd has the best overall performance. The increase of heat source temperature is beneficial to improve the economic performance of the system. The optimal evaporation temperature of each working fluid increases with the heat source temperature. The gray correlation analysis indicates that the comprehensive performance of all six working fluids improves with the heat source temperature.

Key words: organic Rankine cycle; waste heat recovery; thermodynamic analysis; NSGA-II algorithm; multi-objective optimization

收稿日期: 2022-08-07 网络首发日期: 2022-09-27

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (19A480005)

Supported by: Key Scientific Research Project of Colleges and Universities of Henan Province (19A480005)

第一作者简介: 马新灵 (1977), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为低品位热能利用, xinlingma@zzu.edu.cn.

通信作者简介: 孟祥睿 (1974), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为低品位热能利用, mengxr@zzu.edu.cn.

全球能源需求的增长导致环境问题日益突出。低品位能源利用技术是减少温室气体排放、提高能源利用率等的重要途径^[1-2]。有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC) 是一种有效将低品位能转化为高品位电能的技术, 具有性能稳定、配置简单、维护方便、装机容量和热源温度适用范围广等优点, 因此受到越来越多研究者的关注^[3-5]。

ORC 系统利用有机工质进行发电, 工质物性对系统性能有着重要影响, 因而工质的选择及其对系统性能的影响研究备受关注。徐燕燕等^[6]建立了一种基于当量热阻的工质选择方法, 发现热容比为 1 可以使当量热阻最小, 从而性能取得最优, 但评价指标仅涉及热力性能。Ozcan 等人^[7]针对地热能 ORC 系统, 基于热力学和经济学分析提出了四步淘汰法用于筛选工质, 研究中的工况参数为特定条件。Xiu 等人等^[8]提出了一种结合灰色关联法和熵理论的方法用于参数设计和工质选择, 其评价指标较为全面, 但考虑的工况参数较少。韩中等^[9]基于热源参数对 4 种工质进行了热力性能和经济性能对比分析, 结果表明, 同种工质的净功量和热耗率的变化相似且数值接近, 但电力生产成本和投资回收期差别较大。彭斌等^[10]针对 90~240 °C 的低温余热, 进行了工质筛选和性能影响研究, 从多角度进行工质初选, 但系统性能影响研究仅考虑了热力性能。王建永等^[11]针对 90~150 °C 的地热, 对 ORC 系统进行了工质选择和参数优化, 分别指出了热力性能最优工质和经济性最优工质。文献[12]针对 80~180 °C 的地热, 以最大化输出功率为目标对 36 种制冷剂进行了优化研究, 研究的工质种类广泛, 研究结果可为地热能 ORC 系统的设计提供参考。

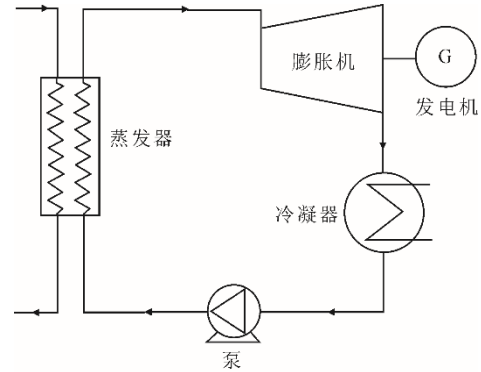
综上所述, 工质的选择受到广泛关注, 然而目前可兼顾多方面性能并同时考虑工质与工况参数之间匹配性的工质筛选方法较少; 大部分针对变温度热源 ORC 系统的研究仅以热力性能为评价指标, 缺乏系统的经济性研究和综合性能的评价方法。本文针对 120~150 °C 的烟气余热, 对亚临界 ORC 系统进行了热力学性能和经济性研究, 基于 NSGA-II 算法对不同工质进行了优化研究, 并通过 TOPSIS 法与灰色关联分析进行了工质筛选, 最后讨论了热源温度对工质选择及工况参数设计的影响。

1 系统模型和优化方法

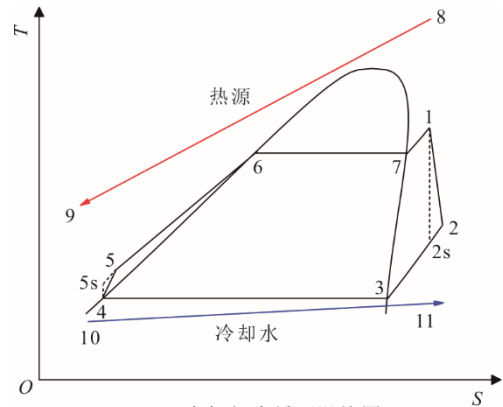
1.1 热力学分析

ORC 系统的主要部件包括蒸发器、冷凝器、循

环泵、膨胀机、发电机。系统的原理如图 1a) 所示。来自工质泵的较高压力的液体有机工质在蒸发器内吸热气化为较高温度的蒸气, 蒸气进入膨胀机做功并带动发电机发电, 然后进入冷凝器中被冷凝为液态, 再泵入蒸发器完成整个循环。系统的温熵图如图 1b) 所示 (1—2—3—4—5—6—7—1)。



a) 有机朗肯循环系统原理



b) 有机朗肯循环温熵图

图 1 有机朗肯循环原理和温熵图

Fig.1 Working principle and T-S diagram of organic Rankine cycle

5—1 是工质在蒸发器中的吸热过程, 吸热量为:

$$\dot{Q}_{\text{eva}} = \dot{m}_{\text{hs}}(h_8 - h_9) = \dot{m}_{\text{wf}}(h_1 - h_5) \quad (1)$$

1—2 是工质在膨胀机中的膨胀做功过程, 膨胀机的输出功率为:

$$\dot{W}_{\text{exp}} = \dot{m}_{\text{wf}}(h_1 - h_{2s})\eta_{\text{s,exp}} = \dot{m}_{\text{wf}}(h_1 - h_2) \quad (2)$$

2—4 是工质在冷凝器中的放热过程, 放热量为:

$$\dot{Q}_{\text{con}} = \dot{m}_{\text{cw}}(h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_{\text{wf}}(h_2 - h_4) \quad (3)$$

4—5 是工质在泵中的升压过程, 泵耗功率为:

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \frac{\dot{m}_{\text{wf}}(h_{5s} - h_4)}{\eta_{\text{s,pp}}} = \dot{m}_{\text{wf}}(h_5 - h_4) \quad (4)$$

各状态点的焓为:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i[h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)] \quad (5)$$

系统的净输出电功率为:

$$\dot{P}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{exp}} \eta_m \eta_g - \frac{\dot{W}_{\text{pump}}}{\eta_{e,pp}} \quad (6)$$

系统的焓效率为:

$$\eta_{\text{ex}} = \dot{P}_{\text{net}} / (\dot{E}_8 - \dot{E}_9) \quad (7)$$

式中: \dot{m}_{hs} 、 \dot{m}_{wf} 、 \dot{m}_{cw} 分别为热源、工质、冷却水质量流量, kg/s; h_1 、 h_2 、……分别为图 1 各状态点焓值, kJ/kg; s_1 、 s_2 ……分别为图 1 各状态点熵, kJ/(kg·K); η_m 、 η_g 、 $\eta_{e,pp}$ 分别为机械效率、发电机效率、泵的机电效率。

1.2 经济学分析

ORC 系统的投资成本主要包括设备成本、运行及管理成本等, 设备成本由式(8)—式(10)计算^[13]。

$$\lg C_b = K_1 + K_2 \lg Z + K_3 (\lg Z)^2 \quad (8)$$

$$C_{\text{bm}} = F_{\text{bm}} C_b = (B_1 + B_2 F_m F_p) C_b \quad (9)$$

$$\lg F_p = C_1 + C_2 \lg p + C_3 (\lg p)^2 \quad (10)$$

式中: C_b 为各部件的基准成本; 当设备为蒸发器或冷凝器时, Z 为传热面积, m^2 , 当设备为膨胀机或泵时, Z 为膨胀机的输出功率或工质泵的耗功率; C_{bm} 为修正后的费用; F_{bm} 为修正系数; F_m 为材料修正系数; F_p 为压力修正系数; K_1 、 K_2 、 K_3 、 B_1 、 B_2 均为设备成本常量系数; C_1 、 C_2 、 C_3 为设备承压等级的常量系数; p 为设备承受压力。各部件的常量系数值参考表 1^[14-15]。

表 1 设备成本计算相关常量系数

Tab.1 Constant coefficient related to equipment cost calculation

部件	常量系数										
	K_1	K_2	K_3	C_1	C_2	C_3	B_1	B_2	F_m	F_{bm}	
蒸发器	4.324 7	-0.303 0	0.163 4	-0.001 64	-0.006 27	0.012 3	1.63	1.66	1.25		
冷凝器	4.830 6	-0.850 9	0.318 7	0.038 81	-0.112 72	0.081 83	1.63	1.66	1.30		
泵	3.389 2	0.053 6	0.153 8	-0.393 5	0.395 7	-0.002 26	1.89	1.35	1.50		
膨胀机	2.247 6	1.496 5	-0.161 8							3.3	
发电机				$C_b=1\ 850\ 000 \cdot (\dot{W}_{\text{exp}} \eta_m \eta_g)^{0.94}$						1.5	

换热器的面积计算按式(11)、式(12)计算。

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta t_m} \quad (11)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\ln(\Delta t_{\text{max}} / \Delta t_{\text{min}})} \quad (12)$$

式中: U 为换热器整体传热系数; Δt_m 为对数平均温差; Δt_{max} 、 Δt_{min} 分别为换热器端部温差的较大值和较小值。本文中的蒸发器和冷凝器分别选取翅片管式换热器、管壳式换热器, 其整体传热系数的计算公式分别为^[16]:

$$U_{\text{ft}} = \frac{1}{\alpha_{\text{in}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o \beta \eta_f} \quad (13)$$

$$U_{\text{st}} = \frac{1}{\alpha_{\text{in}}} \cdot \frac{d_o}{d_{\text{in}}} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_{\text{in}}} + \frac{1}{\alpha_o} \quad (14)$$

式中: α_{in} 、 α_o 分别为管内和管外的表面对流传热系数; δ 为管壁厚度; β 为翅化率; η_f 为翅片效率; d_{in} 、 d_o 分别为管内径、管外径; λ 为管壁导热系数。

考虑到物价上涨、通货膨胀等因素, 还应根据化工行业发布的化工设备成本指数修正设备费用, 计算如下:

$$C_{\text{bm},2020} = C_{\text{CECPI},2020} / C_{\text{CECPI},2001} C_{\text{bm},2001} \quad (15)$$

式中: $C_{\text{CECPI},2020}$ 为 596.2; $C_{\text{CECPI},2001}$ 为 397^[17]。

设备总成本为 C_{tot} :

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{bm,eva}} + C_{\text{bm,con}} + C_{\text{bm,pp}} + C_{\text{bm,exp}} + C_{\text{bm,g}} \quad (16)$$

本文以平准化发电成本 (levelized cost of electricity, LCOE) 为经济评价指标。该指标是对项目寿命期限内的成本和总发电量进行平准化计算而得出的单位电力成本, 其计算公式如下^[18]:

$$C_{\text{LCOE}} = \frac{C_{\text{tot}} + \sum_{i=1}^n (C_{\text{OM}}(1+r)^{-i})}{\sum_{i=1}^n \dot{P}_{\text{net}} \tau_{\text{op}} (1+r)^{-i}} \quad (17)$$

式中: C_{LCOE} 为平准化发电成本; τ_{op} 为系统运行时间, 取值为 8 000 h/a; n 为系统寿命期限, 取值为 25 年; C_{OM} 为每年的运行及维修成本, 取值为设备投资成本的 2.5%; r 为年利率, 取值为 4%^[19-20]。

1.3 多目标优化模型

NSGA-II 算法是一种基于帕累托前沿和最优解的多目标遗传算法, 具有快速排序和精英保存机制^[21]。

本文基于 NSGA-II 算法对 ORC 系统进行多目标优

化, 选取焓效率、平准化发电成本分别作为热力性能和经济性能指标, 以蒸发温度 t_{eva} 、过热度 Δt_{sup} 和蒸发器夹点温差 $\Delta t_{j,eva}$ 为决策变量, 对系统进行参数优化。优化模型的表达式为:

$$\begin{cases} \max \eta_{ex}(t_{eva}, \Delta t_{sup}, \Delta t_{j,eva}) \\ \min C_{LCOE}(t_{eva}, \Delta t_{sup}, \Delta t_{j,eva}) \end{cases} \quad (18)$$

2 循环参数及工况设定

以低温烟气余热的回收利用为背景, 给定的系统条件为: 烟气进口温度 t_8 为 120~150 °C, 流量 m_{hs} 为 10 kg/s。为了避免烟气中水分凝结并有效利用余热源, 设定烟气出口温度不低于 60 °C^[22], 烟气进出口的温差不低于 10 °C, 工质泵和膨胀机的等熵效率分别为 75%、80%^[23], 泵的机电效率、机械效率、发电机效率分别取值为 90%、98%、98%^[24], 冷却水进口温度 t_{10} 即环境温度为 15 °C, 冷凝温度 t_{con} 取 30 °C, 冷凝器的夹点温差设置为 5 °C。为了方便研究, 假设整个系统处于稳定运行状态, 循环过程没有额外的热损失和摩擦损失, 工质在冷凝器出口处于饱和状态^[25], 忽略设备及不同组件之间管道的压降。

工质物性会对系统的性能、投资成本等产生重要影响, 因此工质的筛选是一项重要工作^[2]。在选择工质时, 不仅需要考虑工质的热物性, 也要考虑工质对环境的影响和系统的外部条件。湿工质会在膨胀过程中会出现两相流, 从而影响系统性能, 因此 ORC 系统通常选取等熵工质或干工质。研究表明, 对于亚临界 ORC, 临界温度低于热源温度 50% 的工质性能较差^[7], 因此不宜选择临界温度相较于热源温度过低的工质。在环保方面, 应选择低 ODP (臭氧层破坏系数) 和低 GWP (全球变暖潜能值) 的工质。综合以上考虑, 本文初选 R600a、R236ea、R245fa、R1233zd、R601a、R601 进行研究。6 种工质均为干工质, ODP 均为 0, 且 GWP 较低。各工质的物性参数见表 2。

表 2 工质的物性参数
Tab.2 Physical parameters of working fluids

工质名称	R600a	R236ea	R245fa	R1233zd	R601a	R601
临界温度/°C	135	139	153	166	187	196
临界压力/kPa	3 640	3 410	3 610	3 570	3 378	3 360

本文针对亚临界 ORC 系统进行研究, 控制蒸发压力始终低于工质的临界压力, 过热度取值范围为 0~20 °C, 蒸发器夹点温差取值为 5~20 °C。

3 结果与分析

3.1 不同热源温度下的参数分析

以 R245fa 为例, 上述工况条件下系统性能随工况参数的变化情况如图 2—图 4 所示。从图 2a) 可以看出: 在热源温度较低时, 受热源温度的限制, 在图中的蒸发温度范围内, 焓效率随着蒸发温度的升高而增大, 并且增长幅度逐渐减小; 而在热源温度较高时, 焓效率随着蒸发温度的升高而增大, 并在蒸发温度升高至 120 °C 左右时开始呈现减小的趋势。这主要是因为随着蒸发温度的升高, 工质的预热区逐渐变大, 热源与工质之间的传热温差减小, 因此焓效率增大; 而当蒸发温度较高时, 由于夹点温差固定, 导致热源平均放热温度较高, 从而热源与工质间的传热温差增大, 导致焓效率减小。从图 2b) 可以看出, 不同热源温度下的平准化发电成本均随着蒸发温度的升高先减小后增大, 并且增大幅度随蒸发温度的升高而升高, 存在一个蒸发温度使平准化发电成本达到最小值。

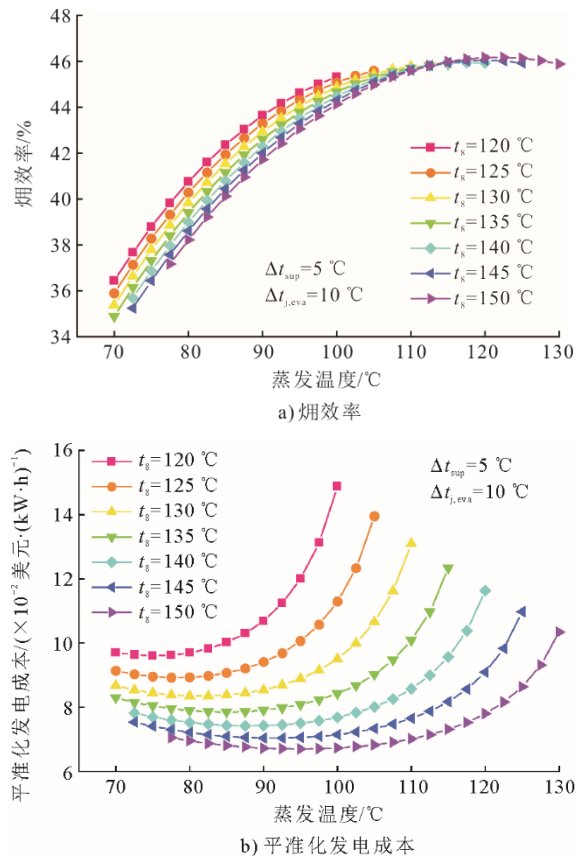


图 2 不同热源温度下系统性能随蒸发温度的变化
Fig.2 The change of system performance with evaporation temperature at different heat source temperatures

从图 3 可以看出, 随着过热度的升高, 不同热

源温度下的焓效率均逐渐减小，而平准化发电成本均有增大的趋势。

由图 4 可见，不同热源温度下的焓效率均随着蒸发器夹点温差的增大而减小。这是因为夹点温差的增大导致蒸发器的传热温差增大，从而焓效率减小。随着蒸发器夹点温差的增大，不同热源温度下的平准化发电成本均呈现增大的趋势，并且增长幅度逐渐变大。这是因为当蒸发温度一定时，夹点温差的增大使热源出口温度升高，从而工质吸热量和系统净发电功率减小，导致平准化发电成本升高。

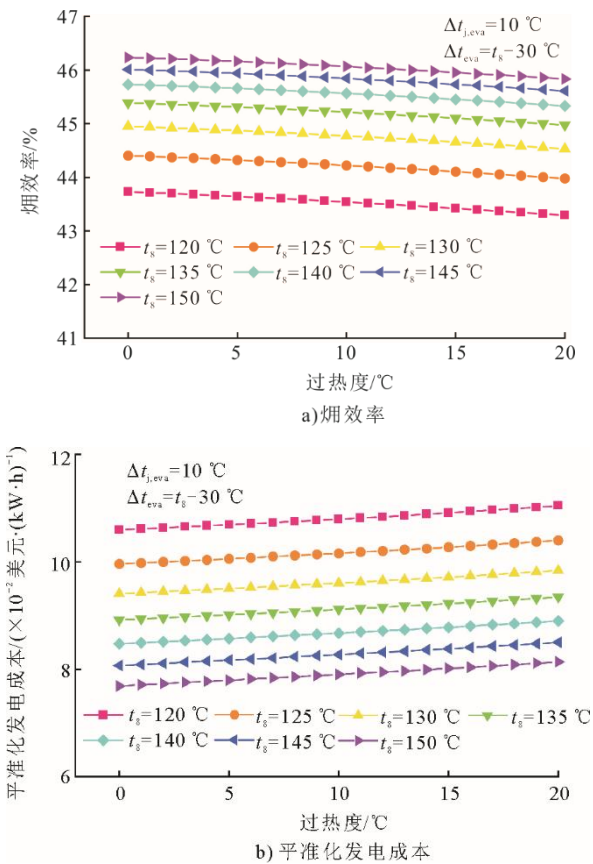


图 3 不同热源温度下系统性能随过热度的变化
Fig.3 The change of system performance with superheat degree at different heat source temperatures

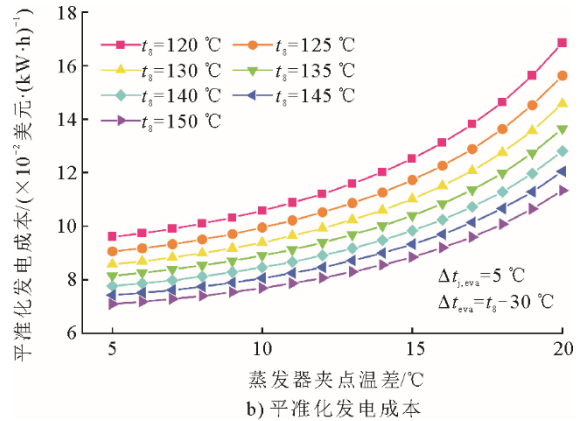
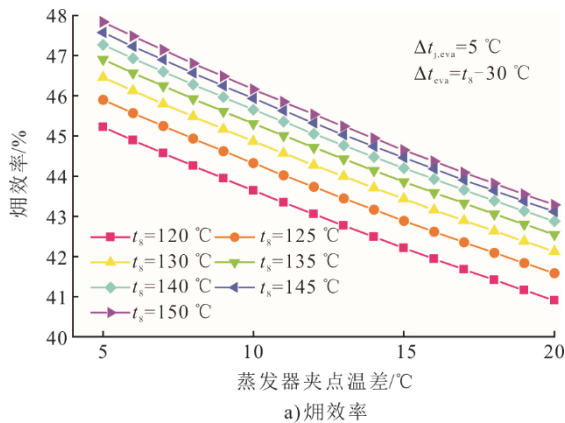


图 4 不同热源温度下系统性能随蒸发器夹点温差的变化
Fig.4 The change of system performance with evaporator pinch point difference at different heat source temperatures

综上所述，不同热源温度下同一循环参数对系统性能的影响相似。过热度和蒸发器夹点温差的升高不利于提升系统性能，而在某热源温度范围内，存在最佳蒸发温度使系统性能达到最好。此外，蒸发温度和蒸发器夹点温差对系统性能的影响较为明显，而过热度对系统性能的影响相对较小。

3.2 优化结果分析

利用 NSGA-II 计算得出各工质的帕累托前沿，通过帕累托前沿可得出各工质的单性能最优解。

TOPSIS 法是解决多目标决策问题的有效方法，通过该方法可从帕累托前沿中决策出兼顾热力性能和经济性的综合最优解^[26]。各工质的综合最优解包含多个性能指标，各指标的量纲不同，因此无法直接判别综合性能的优劣，可采用灰色关联分析各工质的综合最优解进行分析^[27]，从而得出综合性能最优工质。整个分析流程如图 5 所示。

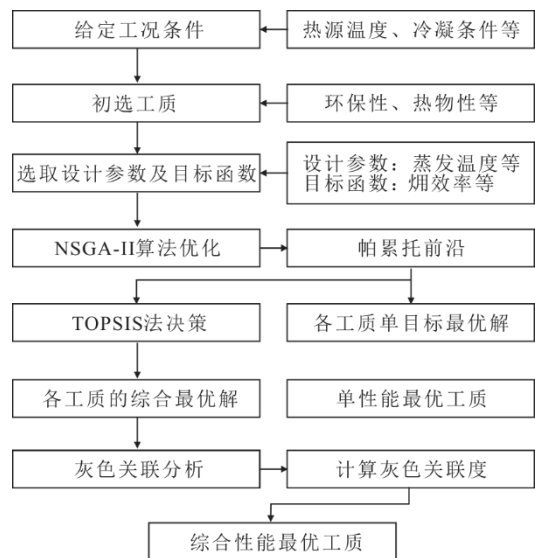


图 5 工质选择流程
Fig.5 Flow chart of working fluid selection

图 6 给出了各工质在热源温度为 120 °C 时的帕累托前沿和综合最优解。从图 6 可以看出, 随着焓效率的升高, 系统的平准化发电成本增加, 并且增加幅度逐渐变大, 说明在该范围内降低系统平准化发电成本和与提高系统焓效率两者不可兼得。此外, 各工质对应的最大焓效率和最小平准化发电成本不同。其中, R601 所能达到的焓效率最大, 为 48.73%, 说明其在该温度下的热力性能最好; R245fa 的平准化发电成本最小, 为 0.092 1 美元/(kW·h), 说明其在该热源温度下的经济性最好。

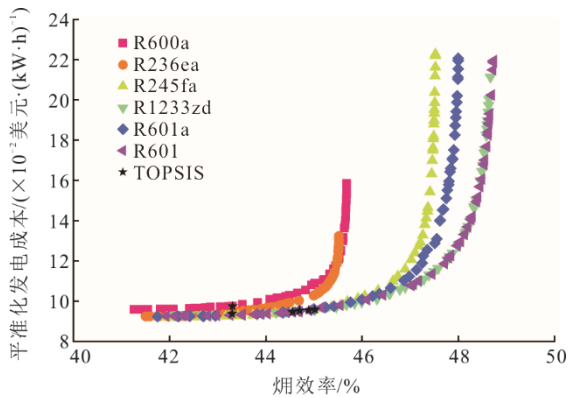


图 6 不同工质的帕累托前沿
Fig.6 Pareto front of different working fluids

各工质在热源温度为 120 °C 时的综合最优性能及对应灰色关联度见表 3。灰色关联度越大说明越接近理想解, 即综合性能越好。R1233zd 的灰色关联度最大, 为 0.739 0, 说明其综合性能最好, 其在最佳工况参数下对应的焓效率和平准化发电成本分别为 45.01% 和 0.095 7 美元/(kW·h)。

综上所述, 在热源温度为 120 °C 时, 焓效率和平准化发电成本作为目标函数有一定的矛盾关系, 即经济性能和热力性能不可兼得, 不同优化目标下的最佳工质不同。

表 3 各工质的综合最优性能及对应灰色关联度
Tab.3 The comprehensive optimal performance and the corresponding grey relational correlation for working fluids

工质	焓效率/%	$C_{LCOE}/(\text{美元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	灰色关联度
R600a	43.31	0.097 4	0.334 0
R236ea	43.30	0.093 8	0.666 5
R245fa	44.56	0.094 5	0.683 1
R1233zd	45.01	0.095 7	0.739 0
R601a	44.70	0.095 2	0.647 5
R600	44.89	0.095 4	0.702 7

3.3 变温度热源下的工质选择及特性分析

图 7 为各工质在不同热源温度下的焓效率变化

情况。由图 7 可以看出, 随着热源温度的升高, 各工质最大焓效率的变化趋势不尽相同。R600a、R236ea 的最大焓效率明显增大, R245fa 的最大焓效率先减小后增大, R1233zd、R601a 的最大焓效率先增大后减小, 而 R601 的最大焓效率在增大至某值后呈现波动的趋势。对比 6 种工质可知, R601 在所有热源温度下的最大焓效率均最高, 说明 R601 在研究范围热源温度下热力性能都最好。

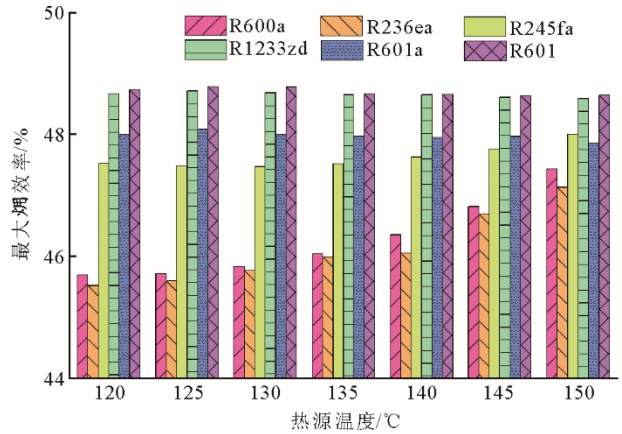


图 7 不同热源温度下的最大焓效率
Fig.7 The maximum exergy efficiency at different heat source temperatures

图 8 为各工质在不同热源温度下最小平准化发电成本的变化情况。各工质的最小平准化发电成本均随着热源温度的升高而减小; 在所有热源温度下, R245fa 的最小平准化发电成本均最低, 说明其在研究范围热源温度下的经济性都最好。

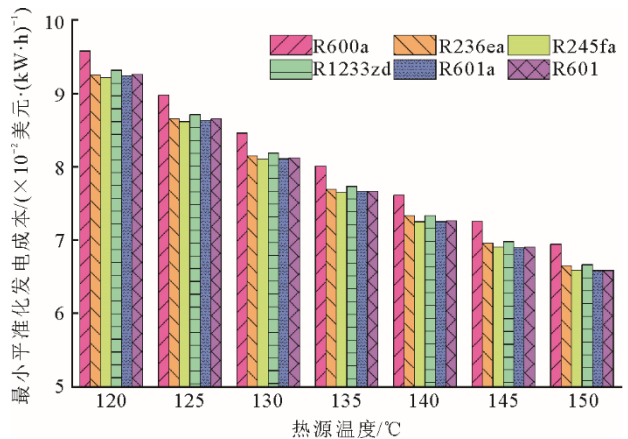


图 8 不同热源温度下的最小平准化发电成本
Fig.8 The minimum levelized cost at different heat source temperatures

对不同热源温度下的综合最优解进行灰色关联分析, 得到的灰色关联度如图 9 所示。由图 9 可以看出, 各工质综合最优解所对应的灰色关联度随

着热源温度的升高均呈现增大的趋势,说明热源温度的升高有利于提升系统的综合性能。此外,热源温度 120~140 °C 时, R1233zd 的灰色关联度最大;而热源温度为 145、150 °C 时, R245fa 的灰色关联度最大,说明 R1233zd、R245fa 适宜回收的热源温度范围不同。

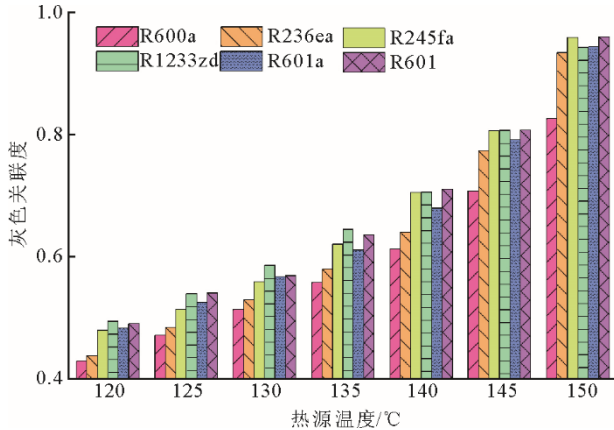


图 9 不同热源温度下的灰色关联度
Fig.9 Grey correlation degree at different heat source temperatures

各工质的综合性能最优解所对应最佳循环参数随热源温度的变化如图 10 所示。由图 10 可以看出:各工质的最佳蒸发温度随着热源温度的升高而升高,最佳过热度基本上趋近于 0 °C,最佳蒸发器夹点温差均趋近 5 °C;此外,不同工质在相同热源温度下的最佳蒸发温度较为接近,低于热源温度 32~45 °C。

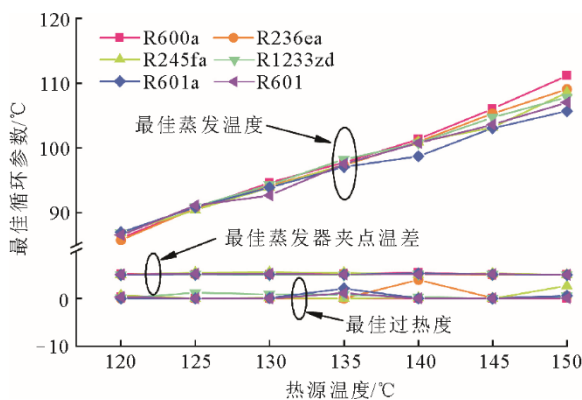


图 10 不同热源温度下的最佳循环参数
Fig.10 The optimal cycle parameters at different heat source temperatures

4 结 论

1) 在本文设定条件下,不同热源温度下同一循环参数对系统性能的影响相似,蒸发温度和蒸发

器夹点温差对系统性能的影响相较于过热度更加明显。

2) 不同优化目标下的最佳工质不同,在热源温度为 120 °C 时, R601 的焓效率最大,为 48.73%, R245fa 具有最低的平准化发电成本,为 0.092 1 美元/(kW·h),通过灰色关联分析发现, R1233zd 的综合性能最优,其在最佳工况参数下的焓效率和平准化发电成本分别为 45.01%、0.095 7 美元/(kW·h)。

3) 采用 NSGA-II 算法与 TOPSIS 法、灰色关联分析结合的方法可以选择出不同热源温度下综合性能最优的工质。

4) 热源温度的变化对优化结果有一定的影响,随着热源温度的升高,各工质的综合性能有所提升,最佳蒸发温度升高,而最佳过热度 and 蒸发器夹点温差无太大变化,均趋于设定值下限。

[参 考 文 献]

- [1] LIN S, ZHAO L, DENG S, et al. Intelligent collaborative attainment of structure configuration and fluid selection for the organic Rankine cycle[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114743.
- [2] WANG S, LIU C, ZHANG S, et al. Multi-objective optimization and fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) system based on economic-environmental-sustainable analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115238.1-115238.17.
- [3] PING X, YANG F, ZHANG H, et al. Energy, economic and environmental dynamic response characteristics of organic Rankine cycle (ORC) system under different driving cycles[J]. Energy, 2022, 246: 123438.1-123438.16.
- [4] ZHENG Z, CAO J, WU W, et al. Parallel and in-series arrangements of zeotropic dual-pressure organic Rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat recovery[J]. Energy Reports, 2022, 8: 2630-2645.
- [5] 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 Xinli, LI Minghui, MA Xinling, et al. Experimental investigation and performance analysis of organic Rankine cycle system[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(2): 73-76.
- [6] 徐燕燕, 叶爽, 黄伟光. 基于当量热阻的 ORC 工质选择方法研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 23-30.
XU Yanyan, YE Shuang, HUANG Weiguang. A method of selecting working fluid and operation conditions at once in an ORC (organic rankine cycle)[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 23-30.
- [7] ÖZCAN Z, EKICI Ö. A novel working fluid selection and waste heat recovery by an exergoeconomic approach for a geothermally sourced ORC system[J]. Geothermics, 2021, 95: 102151.1-102151.13.
- [8] 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.
- [9] 韩中合, 许鸿胜, 范伟, 等. 低温烟气有机朗肯循环系统热力性能与经济性的对比分析[J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4010-4016.
HAN Zhonghe, XU Hongsheng, FAN Wei, et al. Comparison of thermodynamic performance and economic efficiency of ORC system for low temperature flue gas[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(11): 4010-4016.
- [10] 彭斌, 刘帅, 刘慧鑫, 等. 不同工质对有机朗肯循环低温余热发电系统性能的影响研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(2): 43-48.
PENG Bin, LIU Shuai, LIU Huixin, et al. Influence of different working fluids on performance of organic Rankine cycle low temperature waste heat power generation system[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(2): 43-48.
- [11] 王建永, 王江峰, 王红阳, 等. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(1): 11-17.
WANG Jianyong, WANG Jiangfeng, WANG Hongyang, et al. Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in geothermal power plant[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 11-17.
- [12] CHAGNON-LESSARD N, MATHIEU-POTVIN F, GOSELIN L. Geothermal power plants with maximized specific power output: optimal working fluid and operating conditions of subcritical and transcritical organic Rankine cycles[J]. *Geothermics*, 2016, 64: 111-124.
- [13] KAZEMI N, SAMADI F. Thermodynamic, economic and thermo-economic optimization of a new proposed organic Rankine cycle for energy production from geothermal resources[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 121: 391-401.
- [14] ZHANG C, LIU C, XU X, et al. Energetic, exergetic, economic and environmental (4E) analysis and multi-factor evaluation method of low GWP fluids in transcritical organic Rankine cycles[J]. *Energy*, 2019, 168: 332-345.
- [15] LECOMPTE S, LEMMENS S, HUISSEUNE H, et al. Multi-objective thermo-economic optimization strategy for ORCs applied to subcritical and transcritical cycles for waste heat recovery[J]. *Energies*, 2015, 8(4): 2714-2741.
- [16] ZHANG C, LIU C, WANG S, et al. Thermo-economic comparison of subcritical organic Rankine cycle based on different heat exchanger configurations[J]. *Energy*, 2017, 123: 728-741.
- [17] YUAN J, WU C, XU X, et al. Multi-mode analysis and comparison of four different carbon dioxide-based combined cooling and power cycles for the distributed energy system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114476.1-114476.19.
- [18] ABDELHADY S, BORELLO D, SHABAN A. Techno-economic assessment of biomass power plant fed with rice straw: Sensitivity and parametric analysis of the performance and the LCOE[J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 1026-1034.
- [19] HOU Z, WEI X, MA X, et al. Exergoeconomic evaluation of waste heat power generation project employing organic Rankine cycle[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119064.1-119064.11.
- [20] SUN X, LIU L, DONG Y, et al. Multi-objective optimization and thermo-economic analysis of an enhanced compression-absorption cascade refrigeration system and ORC integrated system for cooling and power cogeneration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 236: 114068.1-114068.12.
- [21] WANG Z, ZHANG X, HAN J, et al. Waste heat and water recovery from natural gas boilers: Parametric analysis and optimization of a flue-gas-driven open absorption system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 154: 526-537.
- [22] ZHAO Y, WANG S, GE M, et al. Performance analysis of a thermoelectric generator applied to wet flue gas waste heat recovery[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2080-2089.
- [23] LI J, GE Z, DUAN Y, et al. Design and performance analyses for a novel organic Rankine cycle with supercritical-subcritical heat absorption process coupling[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 1400-1414.
- [24] SUN J, LIU Q, DUAN Y. Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermo-economic performance of geothermal organic Rankine cycle systems[J]. *Geothermics*, 2018, 75: 249-258.
- [25] HUANG W, WANG J, LU Z, et al. Exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of a combined heating and power system driven by geothermal source[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112765.1-112765.13.
- [26] YANG F, ZHANG H, BEI C, et al. Parametric optimization and performance analysis of ORC (organic Rankine cycle) for diesel engine waste heat recovery with a fin-and-tube evaporator[J]. *Energy*, 2015, 91: 128-141.
- [27] BADEMLIOGLU A H, CANBOLAT A S, KAYNAKLI O. Multi-objective optimization of parameters affecting organic Rankine cycle performance characteristics with Taguchi-Grey relational analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 117: 109483.1-109483.13.

(责任编辑 刘永强)