

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-422-09

基于 NSGA-II 和熵权 TOPSIS 法的 ORC 系统性能分析及多目标优化

康旭光 穆永超 王子腾

(河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056038)

【摘 要】 针对低温烟气余热利用不足、有机朗肯循环 (ORC) 热经济性低等问题, 在 130℃ 热源下, 构建基本有机朗肯循环系统 (BORC) 和回热式有机朗肯循环系统 (RE-ORC), 选用工质 R245fa 和 R600 进行对比研究。通过 MATLAB 调用 REFPROP9.1 建立热力学、经济性和空间紧凑性评价模型, 探究蒸发器夹点温差、冷凝温度和过热度对系统性能的影响, 并利用 NSGA-II 进行多目标优化。结果表明: 蒸发器夹点温差、冷凝温度和过热度升高时, RE-ORC 系统的 η_{ex} , LCOE 和 APR 均高于 BORC 系统, 工质 R245fa 的 RE-ORC 系统 η_{ex} 较高, 且工质 R245fa 系统的 LCOE 和 APR 均低于工质 R600; 在最优解下, 采用工质 R600 的 RE-ORC 系统最优 η_{ex} 、LCOE 和 APR 分别为 58.29%、 1.22×10^{-2} \$/kWh 和 $1.16 \text{m}^2/\text{kW}$, 热力学优势明显。采用工质 R245fa 的 BORC 系统最优 η_{ex} 、LCOE 和 APR 分别为 53.75%、 1.08×10^{-2} \$/kWh 和 $0.84 \text{m}^2/\text{kW}$, 经济性优势明显。

【关键词】 有机朗肯循环; NSGA-II; 熵权 TOPSIS 法; 多目标优化

中图分类号 TK123 文献标志码 A

The Performance Analysis and Multi-Objective Optimization of ORC Systems Based on NSGA-II and Entropy Weight TOPSIS Method

Kang Xuguang Mu Yongchao Wang Ziteng

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038)

【Abstract】 To address the issues of insufficient utilization of low-temperature flue gas waste heat and low thermo-economic performance of the Organic Rankine Cycle (ORC), a Basic Organic Rankine Cycle (BORC) and a Regenerative Organic Rankine Cycle (RE-ORC) were constructed at a heat source temperature of 130℃, with R245fa and R600 as working fluids for comparative analysis. Thermodynamic, economic, and spatial compactness evaluation models were established using MATLAB coupled with REFPROP9.1, and the effects of the evaporator pinch point temperature difference, condensation temperature, and degree of superheating on the performance of the systems were investigated. Subsequently, multi-objective optimization was performed using NSGA-II. The results indicated that with increasing evaporator pinch point temperature difference, condensation temperature, and degree of superheating, the RE-ORC system using R245fa exhibits higher η_{ex} , while the system with R245fa shows lower LCOE and APR compared to the system with R600. At the optimal solution, the RE-ORC system with R600 achieved optimal values of η_{ex} , LCOE, and APR of 58.29%, 1.22×10^{-2} \$/kWh, and $1.16 \text{m}^2/\text{kW}$, with a clear thermodynamic advantage. In contrast, the BORC system with R245fa as the working fluid achieved optimal values of η_{ex} , LCOE, and APR of 53.75%, 1.08×10^{-2} \$/kWh, and $0.84 \text{m}^2/\text{kW}$, demonstrating a clear economic advantage.

【Keywords】 Organic Rankine cycle; NSGA-II; Entropy weight TOPSIS method; Multi-objective optimization

作者简介: 康旭光 (2002.10-), 男, 硕士研究生, E-mail: guangx1018@163.com

通讯作者: 穆永超 (1986.01-), 男, 博士, 副教授, E-mail: muyongchao@hebeu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-21

0 引言

全球气候变化日益严峻, 中国提出“双碳”目标, 明确了绿色低碳发展的战略路径^[1-3]。钢铁行业不仅是国民经济的重要支柱, 也是碳排放的主要领域, 提升其能源利用效率对于实现“双碳”目标具有关键作用^[4]。目前, 钢铁生产过程中产生的大量温度低于 200℃ 的烟气往往被直接排放至大气中, 导致烟气余热利用严重不足^[5]。这些低品位余热资源若能得到有效回收利用, 对提高能源利用率和实现工业领域碳减排具有重要意义^[6]。有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, ORC) 发电系统以其系统结构相对简单、维护成本较低等优势, 能够有效实现低温烟气余热的高效回收利用。

近年来, 国内外学者针对低温余热 ORC 发电技术开展了大量研究。叶竹等^[7]选用工质 R245fa、R113 和 R600a, 建立基本型 ORC 系统, 分析了热力学参数对系统热力性能的影响, 研究表明, 热源质量流量变化并不会改变 ORC 系统的焓效率。李慧君等^[8]以 120~150℃ 变温热源为研究对象, 探讨了蒸发温度及热源参数对系统综合性能的作用规律, 研究发现 R1234ze 表现出比 R245fa 和 R134a 更优的综合性能。冯军胜等^[9]以烧结过程余热为热源, 研究了蒸发温度和冷凝温度对基本型 ORC 和回热型 ORC 系统的热经济性的影响, 结果表明系统性能提升依赖于参数匹配和工质选择的优化。韩中合等^[10]针对 130℃ 的地热水热源场景, 采用多目标优化方法对蒸发器面积和总压降进行优化, 得出 R245ca 为综合性能最优工质的结论。Yang 等^[11]以柴油发动机排气废热为热源, 构建了 ORC 系统的热经济模型, 用遗传算法进行目标优化, 求解系统的最大净出功和最小化投资成本。Zhou 等^[12]在 423.15K 热源条件下, 采用非支配排序遗传算法-II 对 ORC 和 RORC 系统开展多目标优化研究, 结果表明 BORC 和 RORC 的最优焓效率分别达到 45.6% 和 38.6%, 热效率分别为 16.6% 和 20.7%。针对现有低温烟气余热回收 ORC 系统的研究工作主要围绕热经济性或双目标分析^[7-12], 而关于多目标分析结合优化决策的研究尚不充分。多目标分析综合考虑多个目标函数之间的权衡关系, 再结合优化决策

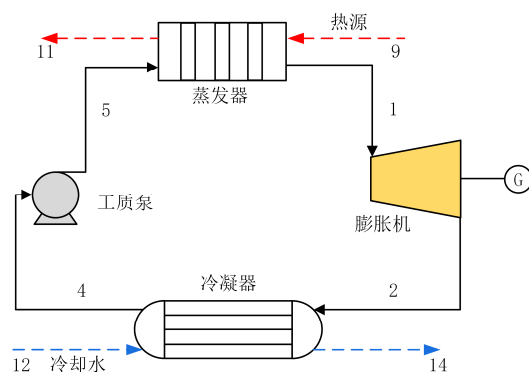
为目标函数进行客观赋权以筛选最优工况, 可以显著提高系统设计的全面性以及决策的客观性。

综上所述, 为有效利用低温烟气余热, 选取工质 R600 和 R245fa, 构建了基本有机朗肯循环 (BORC) 和回热式有机朗肯循环 (RE-ORC) 两种系统的热经济性模型。以焓效率为热力学评价模型, 平准化度电成本为经济性评价模型, 单位输出功率的换热面积为紧凑性评价模型, 建立多目标评价模型。基于 NSGA-II 算法进行多目标优化研究, 并采用熵权 TOPSIS 确定工质的两系统最优热经济性。通过分析运行参数对系统热经济性的影响规律, 为低温烟气余热 ORC 系统的实际运行提供技术参考。

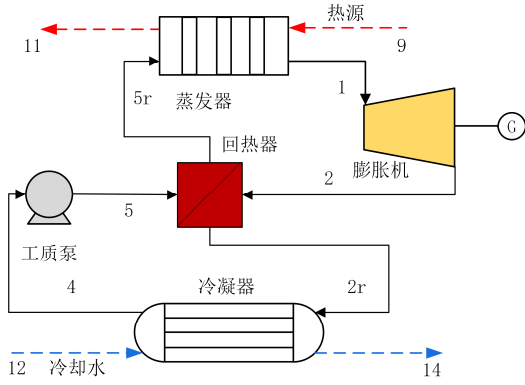
1 ORC 系统模型

1.1 系统原理

图 1 和图 2 分别为 BORC 和 RE-ORC 系统原理图和 T-s 图。BORC 系统主要由蒸发器、膨胀机、冷凝器以及工质泵等关键部件组成。其运行环节为: 吸热环节 5→1, 低温烟气在蒸发器内和有机工质进行热交换, 工质吸热后由液态转变为过热汽态。膨胀环节 1→2, 过热蒸汽通过膨胀机做功, 将热能转换为机械能推动发电机。冷凝环节 2→4, 膨胀后的工质在冷凝器内释放热量凝结成饱和液体。加压环节 4→5, 工质泵将液态工质加压, 再次泵入蒸发器完成循环, 开始下一次循环。RE-ORC 系统增加一个回热器部件, 工作流程包含 2→2r (气态) 和 5→5r (液态) 两个额外的回热过程。



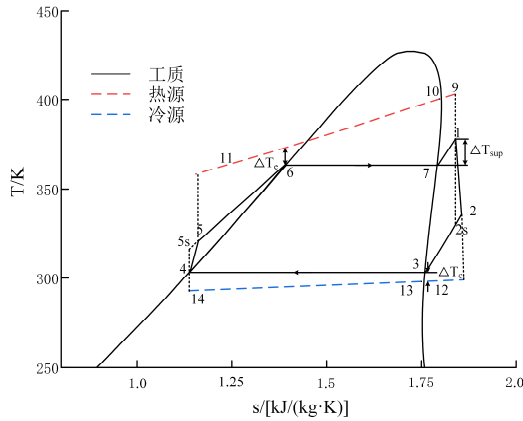
(a) BORC 系统原理图



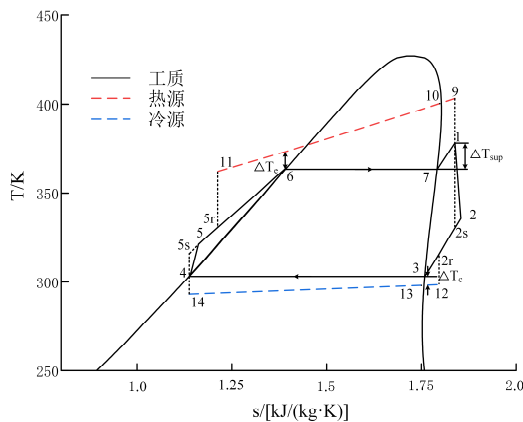
(b) RE-ORC 系统原理图

图 1 BORC 和 RE-ORC 系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of BORC and RE-ORC systems



(a) BORC 系统 T-s 图



(b) REORC 系统 T-s 图

图 2 BORC 和 RE-ORC 系统 T-s 图

Fig.2 T-s diagrams for the BORC and RE-ORC systems

1.2 热力学评价模型

通过热力学第一定律和图 2 中的热力循环对有机朗肯循环系统主要部件进行分析, 计算系统的

焓效率 η_{ex} 等热力性能指标, 建立 BORC 和 RE-ORC 热力学评价模型。

BORC 系统热力学评价模型:

$$\begin{cases} \text{吸热过程 } 5 \rightarrow 1: Q_{eva} = m_f(h_1 - h_5) = c_{p,h}m_1(t_9 - t_{11}) \\ \text{膨胀过程 } 1 \rightarrow 2: W_{exp} = m_f(h_1 - h_2) = m_f(h_1 - h_{2s})\eta_e \\ \text{冷凝过程 } 2 \rightarrow 4: Q_{con} = m_f(h_2 - h_4) = c_{p,l}m_2(t_{14} - t_{12}) \\ \text{加压过程 } 4 \rightarrow 5: W_p = m_f(h_5 - h_4) = m_f(h_{5s} - h_4)/\eta_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_{eva} 为蒸发器换热量, kW; m_f 为工质的质量流量, kg/s; $c_{p,h}$ 为烟气的比热容, kJ/(kg·K); m_1 为烟气质量流量, kg/s; t_9 、 t_{11} 为烟气的进出口温度, °C; h_i ($i=1 \sim 5, 2s, 5s$) 为图 2 中各状态点的焓, kJ/kg; W_{exp} 为膨胀机输出功, kW; η_e 为膨胀机等熵效率; Q_{con} 为冷凝器换热量, kW; $c_{p,l}$ 为冷却水的比热容, kJ/(kg·K); m_2 为冷却水质量流量, kg/s; t_{12} 、 t_{14} 为冷却水的进出口温度, °C; W_p 为工质泵的输出功, kW; η_p 为工质泵等熵效率。

其中, 各状态点的焓 $E_{ex,i}$ 为:

$$E_{ex,i} = m_f[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \quad (2)$$

式中: S_i 为图 2 中各状态点 i 处的熵, kJ/(kg·K); h_0 、 s_0 为工质在环境温度下的焓和熵, kJ/kg、kJ/(kg·K); T_0 为环境温度, K。

BORC 系统各设备焓损分别为:

$$\begin{cases} I_{eva} = T_0 m_f[(s_1 - s_7) - (h_1 - h_7)/T_h] \\ I_{exp} = E_{ex,1} - E_{ex,2} - W_{exp} \\ I_{con} = T_0 m_f[(s_5 - s_2) - (h_5 - h_2)/T_l] \\ I_p = E_{ex,4} - E_{ex,5} + W_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{eva} 、 I_{exp} 、 I_{con} 和 I_p 为蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵的焓损, kW; T_h 和 T_l 为热源和冷源的对数平均温度, K。

其中, 热源和冷源的对数平均温度 T_H 和 T_L 分别为:

$$\begin{cases} T_H = \frac{t_9 - t_{11}}{\ln\left(\frac{t_9}{t_{11}}\right)} \\ T_L = \frac{t_{14} - t_{12}}{\ln\left(\frac{T_{14}}{T_{12}}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

RE-ORC 系统热力学评价模型:

$$\begin{cases} \text{吸热过程 } 5r \rightarrow 1: Q_{eva} = m_f(h_1 - h_{5r}) = c_{p,h}m_1(t_9 - t_{11}) \\ \text{膨胀过程 } 1 \rightarrow 2: W_{exp} = m_f(h_1 - h_2) = m_f(h_1 - h_{2s})\eta_e \\ \text{回热过程 } 2 \rightarrow 2r: Q_{re} = m_f(h_2 - h_{2r}) = m_f(h_5 - h_{5r}) \\ \text{冷凝过程 } 2r \rightarrow 4: Q_{con} = m_f(h_{2r} - h_4) = c_{p,w}m_2(T_{14} - T_{12}) \\ \text{加压过程 } 4 \rightarrow 5: W_p = m_f(h_5 - h_4) = m_f(h_{5s} - h_4)/\eta_p \end{cases} \quad (5)$$

式中: $h_i (i=1\sim 5, 2s, 2r, 5s, 5r)$ 为图 2 中各状态点的焓, kJ/kg;

RE-ORC 系统各设备焓损分别为:

$$\begin{cases} I_{eva} = T_0 m [(s_1 - s_{5r}) - (h_1 - h_{5r}) / T_h] \\ I_{exp} = E_{ex,1} - E_{ex,2} - W_{exp} \\ I_{RE} = T_0 m [(s_{5r} - s_5) + (s_{2r} - s_2)] \\ I_{con} = T_0 m [(s_5 - s_{2r}) - (h_4 - h_{2r}) / T_c] \\ I_p = E_{ex,4} - E_{ex,5} + W_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_{RE} 为回热器的焓损, kW; 其他设备焓损与式 (3) 一致; s_i 、 h_i 下标为图 2 中的各状态点。

以系统 η_{ex} 作为系统热力性评价指标, BORC 和 RE-ORC 系统焓效率 $\eta_{ex,B}$ 、 $\eta_{ex,RE}$ 分别为:

$$\begin{cases} \eta_{ex,B} = \frac{W_{net}}{W_{net} + I_{tot,B}} \\ \eta_{ex,RE} = \frac{W_{net}}{W_{net} + I_{tot,RE}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: W_{net} 为系统的净输出功, kW。

系统的净输出功 W_{net} 为:

$$W_{net} = W_{exp} - W_p \quad (8)$$

BORC 和 RE-ORC 系统总焓损 $I_{tot,B}$ 、 $I_{tot,RE}$ 分别为:

$$\begin{cases} I_{tot,B} = I_{exp} + I_p + I_{eva} + I_{con} \\ I_{tot,RE} = I_{exp} + I_p + I_{eva} + I_{con} + I_{RE} \end{cases} \quad (9)$$

1.3 经济性评价模型

选用平准化度电成本 (Levlized cost of energy, LCOE) 建立系统经济性评价模型。LCOE 指整个系统的生命周期内的投资、运营和维护等成本平均得到的每度电的发电成本, LCOE 为:

$$LCOE = \frac{C_{tot,2020} \cdot C_{CRF} + C_{COM}}{W_{net} \cdot t_{op}} \quad (10)$$

式中: $C_{tot,2020}$ 为 2020 年系统初期投资资本; C_{CRF} 为资本回收系数; C_{COM} 为系统的年度运行维护成本, 占总成本的 1.5%; t_{op} 为设备的年运行时长, 设置为 7500h^[13]。

其中, 资本回收系数 C_{CRF} 为:

$$C_{CRF} = \frac{r \cdot (1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (11)$$

式中: r 为年利率, 取 12%; y 为设备运行寿命, 取 20a。

2020 年系统初期投资成本 $C_{tot,2020}$ 为:

$$C_{tot,2020} = C_{tot,2001} \frac{C_{EPCI,2020}}{C_{EPCI,2001}} \quad (12)$$

式中: $C_{tot,2001}$ 为 2001 年系统总投资成本, \$; $C_{EPCI,2001}$ 为 2001 年化工成本系数, 为 394.3^[14]; $C_{EPCI,2020}$ 为 2020 年化工成本系数, 为 596.2^[15]。

则 BORC 和 RE-ORC 的 2001 年系统初期投资成本 $C_{tot,2001,B}$ 、 $C_{tot,2001,RE}$ 为:

$$\begin{cases} C_{tot,2001,B} = C_{eva} + C_{exp} + C_{con} + C_{pump} \\ C_{tot,2001,RE} = C_{eva} + C_{exp} + C_{con} + C_{pump} + C_{RE} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_j (j=eva, exp, con, pump, RE)$ 为设备的投资成本。

系统各设备初投资成本如表 1 所示^[16]。

表 1 系统各设备初投资成本

Table 1 The initial capital outlay for each unit of equipment within the system

设备	投资成本/\$
蒸发器	$C_{eva}=16000(A_{eva}/100)^{0.6}$
膨胀机	$C_{exp}=475W_{exp}^{0.75}$
冷凝器	$C_{con}=516.62A_{con}^{0.6}$
回热器	$C_{RE}=12000(A_{RE}/100)^{0.6}$
工质泵	$C_p=200W_p^{0.65}$

换热器内的换热面积 A_i 为:

$$A_i = \frac{Q_i}{U_i \Delta T_i} \quad (14)$$

式中: A_i 为各换热器的换热面积, m²; Q_i 、 U_i 和 ΔT_i 为各换热器的换热量、平均换热系数和对数平均温差, kW、kW/(m²·K)、K。

其中, 换热器的对数平均温差为:

$$\Delta T_i = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)} \quad (15)$$

式中: ΔT_{max} 和 ΔT_{min} 为换热器内的最大温差和最小温差, K。为了简化计算便于不同系统的比较, 采用平均换热系数进行计算, 各换热器内平均换热系数如表 2^[17]所示。

表 2 换热器的平均换热系数[W/(m²·K)]

Table 2 The average heat transfer coefficient of the heat exchanger [W/(m²·K)]

蒸发器	冷凝器	回热器
$U_{eva}=568$	$U_{con}=865W$	$U_{RE}=568$

1.4 空间紧凑性评价模型

系统单位输出功率所需的换热面积 APR ^[18]为:

$$APR = \frac{A_{tot,i}}{W_{net}} \quad (16)$$

式中: $A_{\text{tot},i}$ 为系统总换热面积, m^2 。

其中, 两系统的换热面积 $A_{\text{tot},B}$, $A_{\text{tot},RE}$ 分别为:

$$\begin{cases} A_{\text{tot},B} = A_{\text{eva}} + A_{\text{con}} \\ A_{\text{tot},RE} = A_{\text{eva}} + A_{\text{con}} + A_{RE} \end{cases} \quad (17)$$

式中: A_{eva} 、 A_{con} 和 A_{RE} 为蒸发器、冷凝器和回热器的换热面积。

1.5 系统有机工质筛选

有机工质对 ORC 系统的热经济性影响显著^[19], 因此其选择至关重要。用于循环的工质应满足以下要求:

(1) 安全性: 选择无毒、不易燃、化学性质稳定的工质。

(2) 工质类型: 选用干工质或等熵工质, 避免腐蚀和结垢等问题。

(3) 热力性能: 选用具有良好的热力性能, 价格低廉且易于获得的工质。

(4) 环保性: 选择低全球变暖潜力 (GWP) 和低臭氧消耗潜力 (ODP) 的工质。

基于以上筛选要求, 本文选择了 R245fa 和 R600 作为研究工质。其物性参数如表 3 所示。

表 3 工质物性参数

Table 3 The thermophysical parameters of the working

fluid		
工质	R600	R245fa
沸点/K	272.65	288.25
临界温度/K	407.81	427.15
临界压力/MPa	3.63	3.65
安全性	A3	B1
ODP	0	0
GWP	4	1050
类型	干	干

1.6 模型验证

为验证构建模型的准确性, 在相同的系统设计下, 采用洪云川等^[20]的结果验证了以 R245fa 为工质的 BORC 和 RE-ORC 系统的计算结果。由图 3 可以看出, 本文计算所得两系统热效率 η_{th} 与文献结果高度吻合, 偏差均未超过 3%。因此, 证明模型的验证误差均处于合理范围内, 本研究开发的模型具有可靠性。

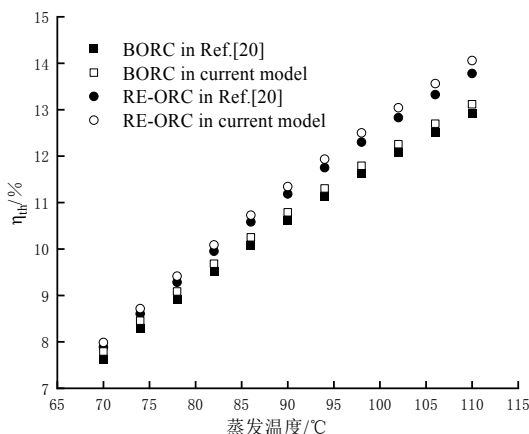


图 3 计算结果与文献[20]研究结果的比较

Fig.3 Comparison of current calculational results with research results in Ref [20]

2 多目标优化模型与决策

2.1 多目标优化模型

为了全面评估 BORC 和 RE-ORC 系统的热经济性, 选取蒸发器夹点温差 ΔT_e , 冷凝温度 T_{con} 和过热度 ΔT_{sup} 为决策变量, 最大烟效率 η_{ex} , 最小平准化度电成本 LCOE 和单位输出功率的换热面积 APR 为目标函数, 构建多目标优化模型为:

$$\begin{cases} \max \eta_{\text{ex}}(\Delta T_e, T_{\text{con}}, \Delta T_{\text{sup}}) \\ \min LCOE(\Delta T_e, T_{\text{con}}, \Delta T_{\text{sup}}) \\ \min APR(\Delta T_e, T_{\text{con}}, \Delta T_{\text{sup}}) \end{cases} \quad (18)$$

决策变量的约束范围如表 4 所示。

表 4 决策变量的约束范围

Table 4 The feasible ranges of the decision variables

决策变量	符号	范围
蒸发器夹点温差	$\Delta T_e / ^\circ\text{C}$	5–20
冷凝温度	$T_{\text{con}} / ^\circ\text{C}$	5–20
过热度	$\Delta T_{\text{sup}} / ^\circ\text{C}$	5–30

2.2 多目标优化与熵权 TOPSIS 法决策

优化过程采用基于 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 的优化方法, NSGA-II 作为多目标优化领域的经典算法, 能够有效求解多目标函数的 Pareto 最优解集。算法参数设置为: 迭代次数 100 代, 种群规模 100, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.2。

BORC 系统和 RE-ORC 系统的约束条件分别为:

$$\begin{cases} t_1 + \Delta T_c < t_9 \\ t_7 + \Delta T_c < t_{10} \\ t_5 + \Delta T_c < t_{11} \\ t_{12} + \Delta T_c < t_4 \\ t_{14} + \Delta T_c < t_2 \end{cases} \begin{cases} t_1 + \Delta T_c < t_9 \\ t_7 + \Delta T_c < t_{10} \\ t_{5a} + \Delta T_c < t_{11} \\ t_{12} + \Delta T_c < t_4 \\ t_{14} + \Delta T_c < t_{2r} \end{cases} \quad (19)$$

BORC 系统和 RE-ORC 系统参数设置如表 5 所示。

表 5 系统参数

Table 5 System parameters

参数	数值
热源入口温度/°C	130
环境压力/Pa	101325
烟气质量流量/(kg/s)	20
冷凝器夹点温差/°C	5
冷却水进口温度/°C	20
膨胀机等熵效率/%	85
工质泵等熵效率/%	85

对于 Pareto 最优前沿中 100 个种群个体, 采用熵权 TOPSIS 法进行最优解决策, 求 pareto 最前沿解中的最优解。步骤如下: 针对 Pareto 最优前沿解构建评价矩阵; 其次, 对评价矩阵进行无量纲化处理, 得到标准化决策矩阵; 通过求解各评价指标的权重, 构建加权决策矩阵, 并确定正、负理想解; 最后, 计算每个指标与正负理想解的距离, 确定各评价指标和理想解的相对距离, 最终获得最优解。

3 结果分析

3.1 蒸发器夹点温差的影响

图 4 展示了以 R245fa 为工质时, 两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随 ΔT_c 的变化规律。如图 4 所示, 随 ΔT_c 增大, 两系统 η_{ex} 均呈下降趋势。这是由于随 ΔT_c 的增大, 系统的净输出功率和总焓损均减少, 但前者的下降速率更快, 使得焓效率降低。BORC 和 RE-ORC 的 η_{ex} 分别从 54.33%降低至 48.61%, 56.30%降低至 50.75%; 此外, 两系统 LCOE 随 ΔT_c 增加而上升, 尽管 ΔT_c 增大, 会同时降低系统的初投资成本和系统总焓损, 但总焓损的下降速率更快, 最终 LCOE 增加。BORC 和 RE-ORC 的 LCOE 增长率分别 15.20%和 16.01%; 还可看出, 两系统 APR 均随 ΔT_c 的增大呈降低趋势。这是因为随 ΔT_c 的增大使系统总换热面积减小, 虽然系统的净输出

功也随之降低, 但换热面积的减小速率更快。其中, BORC 和 RE-ORC 的 APR 分别从 0.914m²/kW 降低至 0.837m²/kW, 从 1.194m²/kW 降低至 1.111m²/kW。

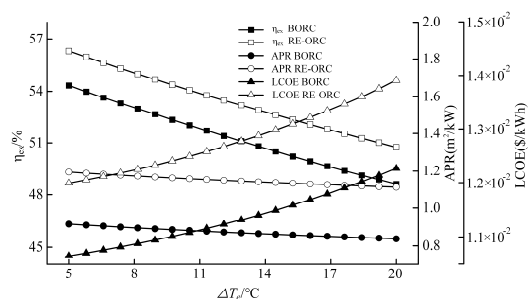
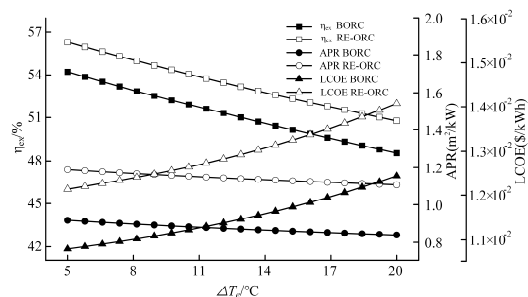
图 4 R245fa 的两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随 ΔT_c 的变化Fig.4 Dependence of the two R245fa systems' η_{ex} , LCOE and APR on ΔT_c

图 5 展示了以 R600 为工质时, 两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随 ΔT_c 的变化规律。可以看出, 其变化趋势与图 4 一致, BORC 的 η_{ex} 由 54.22%降低至 48.54%, RE-ORC 的 η_{ex} 由 56.25%降低至 50.77%; BORC 和 RE-ORC 的 LCOE 增长率分别 15.25%和 16.03%; BORC 的 APR 由 0.917m²/kW 降低至 0.840m²/kW, RE-ORC 的 APR 由 1.188m²/kW 降低至 1.104m²/kW。综合图 4 与图 5 可得出以下结论: 在 ΔT_c 的变化范围内, 采用 R245fa 工质的两系统的 η_{ex} 均优于 R600 工质; 采用相同工质系统的 LCOE 单调增大; 此外, R245fa 下的 BORC 系统具有较小的 APR, 表现出更优的紧凑性。

图 5 R600 的两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随 ΔT_c 的变化Fig.5 Dependence of the two R245fa systems' η_{ex} , LCOE and APR on ΔT_c

3.2 冷凝温度的影响

图 6 展示了以 R245fa 为工质时, 两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随着 T_{con} 的变化规律。随着 T_{con} 的升高, 两系统的 η_{ex} 均呈下降趋势, 这是由于系统净输出功率的下降速率快于总焓损的减少速率。BORC

的 η_{ex} 从55.95%降低到40.55%，而RE-ORC系统 η_{ex} 从59.88%降低到42.83%；相反，两系统的LCOE随着 T_{con} 的升高而上升，增长率分别为38.68%和40.18%。主要原因在于系统净输出功的下降速率大于总换热面积的减小速率，导致LCOE增加；APR随 T_{con} 升高呈先降后升的非单调变化规律。这是因为换热初期， T_{con} 升高使冷凝器传热温差增大，系统总换热面积减小为主要影响，导致APR下降；当 T_{con} 继续升高，系统净输出功的减小速率快于换热面积的减少速率，APR开始增大。两系统分别在 T_{con} 为28.9℃和30.26℃时，达到APR最小值0.839m²/kW和1.097m²/kW。

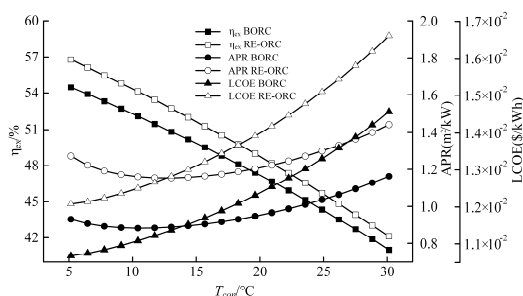


图6 R245fa的两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随 T_{con} 变化

Fig.6 Dependence of the two R245fa systems' η_{ex} 、LCOE

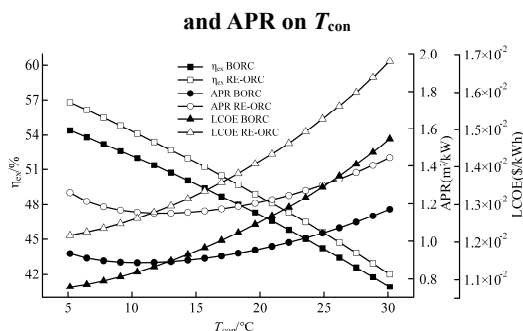


图7 R600的的两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随 T_{con} 变化

Fig.7 Dependence of the two R600 systems' η_{ex} 、LCOE

and APR on T_{con}

图7展示了以R600为工质的两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随着 T_{con} 的变化规律。结果显示，其整体变化趋势和图6一致，两系统 η_{ex} 分别从53.36%降低至40.54%，57.05%降低至42.47%；LCOE增长率分别为40.33%和42.22%。当 T_{con} 分别为28.94℃和30.26℃时，两系统APR有最小值，分别为0.877m²/kW和1.145m²/kW。综合图6与图7可得出以下结论：在相同 T_{con} 条件下，RE-ORC系统的 η_{ex} 始终高于BORC系统；当 T_{con} 处于28.94℃–32.89℃区间时，两种工质的系统的LCOE相差较

小；在 T_{con} 变化范围内，R600工质的两系统LCOE均高于R245fa工质，表明R245fa在经济性方面更具优势。

3.3 过热度的影响

图8展示了以R245fa为工质时，两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随着 ΔT_{sup} 的变化情况。随 ΔT_{sup} 升高，两系统 η_{ex} 呈相反的变化趋势。对于BORC系统，系统净输出功的下降速率快于系统总焓损的减少速率，导致 η_{ex} 由52.22%降至51.37%。而对于RE-ORC系统，由于回热器的引入，总焓损的减少速率快于系统净输出功减少速率， η_{ex} 由54.26%升至55.89%；此外，两系统LCOE均随 ΔT_{sup} 升高而增加，增长率分别为7.95%和8.56%，这是因为系统净输出功的下降速率超过初期投资成本的降低速率；还可以看出，APR呈先降后升的非单调变化规律。其原因是随着 ΔT_{sup} 升高，系统总换热面积先减小后增大，而系统净输出功持续下降。换热初期，换热面积的减小为主要影响，当 ΔT_{sup} 继续升高，净输出功降幅的影响逐渐显现。两系统分别在 ΔT_{sup} 为15.52℃和16.84℃时，达到APR最小值0.840m²/kW和1.096m²/kW。

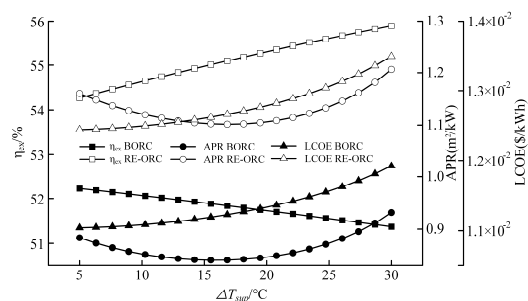


图8 R245fa的两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随 ΔT_{sup} 变化

Fig.8 Dependence of the two R245fa systems' η_{ex} 、LCOE

and APR on ΔT_{sup}

图9展示了以R600为工质时，两系统 η_{ex} 、LCOE和APR随着 ΔT_{sup} 的变化情况。结果显示，其整体变化趋势与图8保持一致，BORC系统的 η_{ex} 由51.61%降至50.55%，而RE-ORC系统由53.70%升至55.60%。两系统的LCOE增长率分别为7.90%和8.64%。两系统均在 ΔT_{sup} 为16.84℃时，达到最小值，0.878m²/kW和1.143m²/kW。综合图8与图9可得出以下结论：在相同 ΔT_{sup} 条件下，R245fa工质的两系统焓效率均优于R600工质，此外，两系统LCOE和APR均低于工质R600。这是由于R245fa具有较高的沸点和临界温度，在相同 ΔT_{sup}

下, R245fa 工质的系统能实现较高的输出功率。较高的输出功摊薄了换热面积与投资成本, 降低了 LCOE 和 APR。表明 R245fa 工质在经济性和紧凑性方面表现更佳。

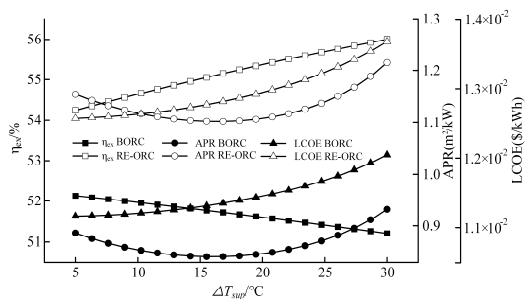


图 9 R600 的两系统 η_{ex} 、LCOE 和 APR 随 ΔT_{sup} 变化

Fig.9 Dependence of the two R600 systems' η_{ex} 、LCOE and APR on ΔT_{sup}

3.4 多目标优化结果分析

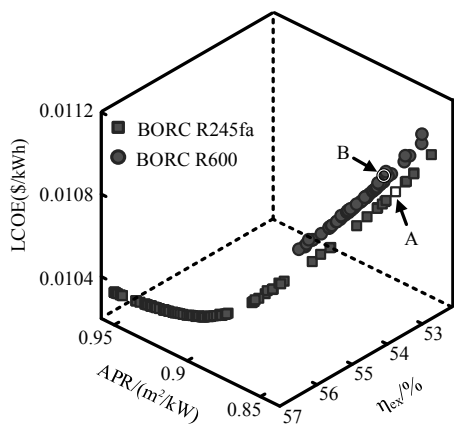


图 10 BORC 系统的 Pareto 前沿解

Fig.10 Pareto frontier solution of BORC system

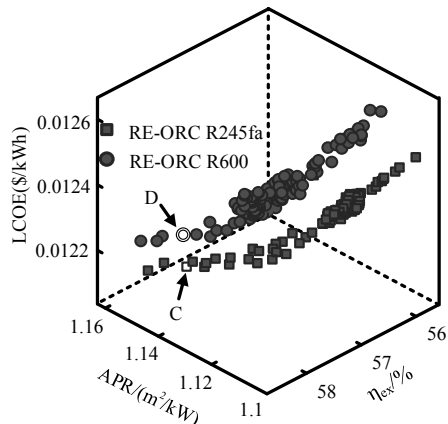


图 11 RE-ORC 系统 Pareto 前沿解

Fig.11 Pareto frontier solution of RE-ORC system

表 6 熵权 TOPSIS 法最优解和最优决策变量

Table 6 The optimal solution obtained by the entropy-weighted TOPSIS method and the decision variables at the optimum

参数	BORC		RE-ORC	
	A	B	C	D
	R245fa	R600	R245fa	R600
$\eta_{\text{ex}}/\%$	53.75	53.88	57.90	58.29
LCOE/(10^{-2} \$/kWh)	1.08	1.10	1.21	1.22
APR/(m^2/kW)	0.84	0.86	1.15	1.16
$\Delta T_e/^\circ\text{C}$	9.19	8.48	9.12	7.82
$T_{\text{con}}/^\circ\text{C}$	26.45	26.44	25.0	25.57
$\Delta T_{\text{sup}}/^\circ\text{C}$	15.49	16.36	16.61	18.29

对每个 Pareto 前沿解进行熵权 TOPSIS 法决策的最优解结果及最优解的决策变量工况如表 6 所示。由表 6 可知, 对比熵权 TOPSIS 法最优解, 在同一系统内, R600 工质的 η_{ex} 高于工质 R245fa, 而采用工质 R245fa 的 LCOE 和 APR 更低。在同一工质下, RE-ORC 相较 BORC 表现出更高的 η_{ex} 、LCOE 和 APR, R600 工质下分别高 4.41%, 0.12×10^{-2} \$/kWh, $0.30 \text{ m}^2/\text{kW}$; R245f 工质下分别高 4.15%, 0.13×10^{-2} \$/kWh, $0.31 \text{ m}^2/\text{kW}$ 。对比最优解决策变量可知, R245fa 在两系统中的 ΔT_e 均大于 R600; BORC 系统的 T_{con} 高于 RE-ORC 系统; BORC 系统的 ΔT_{sup} 均低于 RE-ORC 系统。

4 结论

本文基于 BORC 和 RE-ORC 系统, 选用 R245fa 和 R600 两种工质, 从热力学、经济性和空间紧凑性等方面分析, 并进行多目标优化, 结论如下:

(1) 随着 ΔT_e 的升高, 两系统的 η_{ex} 和 APR 均呈下降趋势, 而 LCOE 单调增大。在此过程, R245fa 的两系统 η_{ex} 始终高于工质 R600; 且其 LCOE 和 APR 均更低。随着 T_{con} 的升高, 两系统的 η_{ex} 持续降低, 而 LCOE 和 APR 均逐渐增加。当 T_{con} 取约束范围的最小值时, 两系统的热经济性最佳。对于 ΔT_{sup} 的影响, 两系统 η_{ex} 呈相反的变化趋势, 两系统的 LCOE 呈先降后升变化, 两系统 APR 均增加。总体而言, R245fa 在变参数范围时, 展现出更优的综合性能。

(2) 基于多目标优化结果, RE-ORC 的系统的炯效率高于 BORC 系统, BORC 的 LCOE 和 APR

均低于 RE-ORC 系统。R600 工质的 BORC 系统的帕累托前沿解变化范围小于 R245fa 工质；同时，RE-ORC 系统帕累托前沿解的变化范围均大于 BORC 系统。

(3) 采用熵权 TOPSIS 法决策得到工质 R245fa 和 R600 两系统的帕累托前沿最优解。对于不同工质，工质 R600 的最优 η_{ex} 均高于工质 R245fa，最优 LCOE 和 APR 均高于工质 R245fa。对于不同系统，RE-ORC 系统的最优解均高于 BORC 系统；在最优解下，采用工质 R600 的 BORC 系统最优 η_{ex} 、LCOE 和 APR 分别为 58.29%、 1.22×10^{-2} \$/kWh 和 $1.16 \text{ m}^2/\text{kW}$ ，热力学优势明显。采用工质 R245fa 的 BORC 系统最优 η_{ex} 、LCOE 和 APR 分别为 53.75%、 1.08×10^{-2} \$/kWh 和 $0.84 \text{ m}^2/\text{kW}$ ，经济性优势明显。

参考文献:

- [1] Wei Y M, Chen K, Kang J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review[J]. Engineering, 2022,14:52-63.
- [2] Zhong Z, Chen Y, Fu M, et al. Role of CO₂ geological storage in China's pledge to carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060[J]. Energy, 2023,272:127165.
- [3] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022,3(2):141-155.
- [4] 汪旭颖,李冰,吕晨,等.中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):339-346.
- [5] 王国遥.烧结环冷烟气余热梯级利用技术的探索[J].烧结球团,2018,43(2):72-77.
- [6] Farhat O, Faraj J, Hachem F, et al. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022,6:100387.
- [7] 叶竹,张云贺.烧结机烟气余热的有机朗肯循环发电[J].材料与冶金学报,2022,21(5):371-375.
- [8] 李慧君,蒋长辉,范伟,等.变热源有机朗肯循环系统的综合性能分析[J].动力工程学报,2022,42(3):286-292.
- [9] 冯军胜,程新妮,王欢欢,等.低温烟气余热 ORC 系统工质选择及热经济性分析[J].钢铁研究学报,2023,35(9):1174-1183.
- [10] 韩中合,梅中恺,李鹏.有机朗肯循环蒸发器多目标优化设计及工质筛选[J].动力工程学报,2018,38(11):934-940.
- [11] Yang F, Zhang H, Song S, et al. Thermoeconomic multi-objective optimization of an organic Rankine cycle for exhaust waste heat recovery of a diesel engine[J]. Energy, 2015,93:2208-2228.
- [12] Zhou Y, Ruan J, Hong G, et al. Multi-objective optimization of the basic and regenerative ORC integrated with working fluid selection[J]. Entropy, 2022,24(7):902.
- [13] Yazdani M, Gholizadeh M, Khabbazi H, et al. 4E analysis of an integrated solar energy and medical waste management system with PCM storage for healthcare buildings[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025:103681.
- [14] Wang L, Bu X, Li H. Multi-objective optimization and off-design evaluation of organic rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat recovery[J]. Energy, 2020,203:117809.
- [15] 辛佳磊,邵澍晖,桂勇.船用柴油机废气余热驱动 ORC 系统性能研究[J].船舶工程,2022,44(S1):312-319.
- [16] Yang A, Su Y, Shen W, et al. Multi-objective optimization of organic Rankine cycle system for the waste heat recovery in the heat pump assisted reactive dividing wall column[J]. Energy Conversion and Management, 2019,199:112041.
- [17] Liu Y, Ding Y, Yang M, et al. A trigeneration application based on compressed air energy storage integrated with organic Rankine cycle and absorption refrigeration: Multi-objective optimisation and energy, exergy and economic analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105803.
- [18] 侯胜亚,杨其国.超临界 CO₂-有机朗肯联合循环的多目标优化[J].动力工程学报,2024,44(4):658-664.
- [19] Mersch M, Tillmanns D, Sapin P, et al. Integrated thermo-economic organic Rankine cycle and working fluid design—On the accuracy of molecular-based computer-aided methodologies[J]. Computers and Chemical Engineering, 2025,199.
- [20] 洪云川,江文豪,冯军胜,等.烧结环冷机中低温冷却废气 ORC 系统热经济性分析[J].冶金能源,2025,44(4):44-49.