

文章编号: 1671-6612 (2021) 01-58-06

基于 PSO 算法优化的热水分流式双级 ORC 系统

王诗祺 袁中原

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 以有机朗肯循环的结构优化为基础,建立了热水分流式双级有机朗肯循环数值模型,以粒子群算法为计算方法分析系统设计时最大净输出功,通过理论分析得到了影响系统净输出功的独立变量为热水经过高压蒸发器时换热后的温度和热水出口温度。结果表明热水分流式双级有机朗肯循环可以对热水进行更好的利用,高压循环蒸发温度随着热水入口温度升高更快;热水在进行分流的过程中随着热水入口温度的升高,分流比下降;热水入口温度更高时采用该系统更有优势。

【关键词】 有机朗肯循环; 粒子群优化算法; 热源分流; 净输出功

中图分类号 TM617 文献标识码 A

Heat Water Split-flow Dual-pressure ORC System Based on PSO Algorithm Optimization

Wang Shiqi Yuan Zhongyuan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Based on the structure optimization of organic Rankine cycle, a numerical model of hot water split-flow dual pressure organic Rankine cycle is established in this paper. The maximum net output power of the system is analyzed by using particle swarm optimization algorithm. The independent parameters that affect the net output power of the system are obtained by theoretical analysis, which are the high-pressure evaporator outlet temperature of hot water and the system outlet temperature of hot water. The results show that the hot water split-flow dual-pressure organic Rankine cycle can make better use of hot water, and the evaporation temperature of high-pressure cycle increases faster with the inlet temperature of hot water. In the process of hot water diversion, with the increase of hot water inlet temperature, the split ratio decreases. When the inlet temperature of hot water is higher, the system has more advantages.

【Keywords】 ORC system; Particle swarm optimization algorithm; hot water split flow; net output power

基金项目: 四川省科技计划项目: 基于分级冷却的工业余热高效能量回收系统 (2019YFG0327)

作者简介: 王诗祺 (1997.5-), 女, 硕士研究生, Email: wangshiqi@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 袁中原 (1983.8-), 男, 博士, Email: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-15

0 引言

随着世界经济飞速发展,各国对能源的需求也在稳步增长,在 2018 年,全球一次能源的需求增长了 2.9%,其中的三分之二来自于中国、美国、印度三国。由此导致的碳排放量增长了 2%^[1]。我国是全球最大的煤炭生产国,煤制油技术通过化学加工产出汽油、柴油、航空煤油,能够大大减少由

于煤直接燃烧而造成的各种污染,煤、电以及煤化工产品(尤其是煤制油产品)的同时输出,势必迎来煤制油技术的快速发展^[2,3]。煤制油工艺仍然不能完全避免高碳排放、高耗水量等问题,工艺中会产生大量的低温工业热水和蒸汽,这些热水和蒸汽作为工业余热如果不加以利用就排出,会极大的浪费能源。有机朗肯循环(ORC)是以低沸点有机物

为工质的朗肯循环,作为一种结构简单、造价较低、环境友好的余热发电技术,能够较好的回收中低温热源的能量,具有很大的发展潜力。

为了优化 ORC 系统的设计和运行参数,很多研究通过优化算法对 ORC 系统进行优化,以实现高效热回收。Xi 等^[12]利用遗传算法(GA)分析了三种 ORC 系统(包括简单 ORC、单级回热 ORC 和双级回热 ORC 系统)分别在 6 种不同工质下的最优运行条件。Palagi 等^[13]提出了基于多目标优化神经网络模型的 ORC 性能优化方法,该方法将循环的热力参数与径流式涡轮机的主要设计参数耦合起来。Kim 等^[14]分别用 RTDM 和 RITAL 程序对 ORC 的径向涡轮进行了实验,并利用深层神经网络对实验趋势进行了预测分析。Ochoa 等^[15]利用粒子群优化算法(PSO)对 ORC、单级回热 ORC 和双级 ORC 的热经济性进行了分析,得出双级 ORC 系统的性能可以得到更好的改善,其中双级 ORC 允许最大净输出功率为 99.52kW。Özkaraca 等^[16]采用人工蜂群算法(ABC)模拟实际空冷 ORC 二元地热发电机组,研究了最大焓效率。杨富斌^[17]以净输出功最大和柴油机出口温度最低的多目标优化方式联合神经网络和遗传算法对 ORC 系统的关键参数进行了并行优化。

为了进一步优化有机朗肯循环的运行,本文提出了热水分流的双级有机朗肯循环系统,以热水为热源, R245fa 为工质,以净输出功最大为优化目标,采用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO),研究影响热源分流的双级 ORC 系统净输出功的独立变量,从而获得系统最大净输出功和最佳系统参数。

1 数值模型

1.1 模型介绍

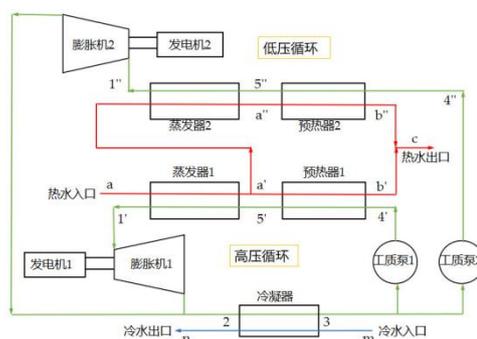


图 1 热水分流式双级 ORC 系统示意图

Fig.1 Hot water split-flow dual-pressure ORC system

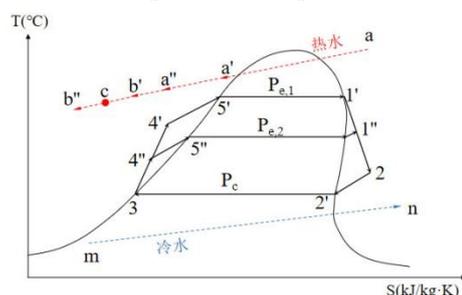


图 2 热水分流式双级 ORC 系统 $T-s$ 图

Fig.2 Hot water split-flow dual-pressure ORC thermodynamic $T-s$ diagram

图 1 和图 2 分别为热源分流式双级有机朗肯循环(SFD-ORC)的系统图和 $T-s$ 图。SFD-ORC 系统由高压膨胀机 1、低压膨胀机 2、2 个发电机、冷凝器、高压蒸发器 1、高压预热器 1、低压蒸发器 2、低压预热器 2、高压工质泵 1、低压工质泵 2 组成。SFD-ORC 系统分为高压循环和低压循环过程,高压循环的工作过程为 $1'-2-3-4'-5'-1'$, 低压循环流程为 $1''-2'-3'-4''-5''-1''$ 。

1.2 模型假设

本文基于以下假设建立 SFD-ORC 的数值模型

- (1) 系统以稳定状态运行;
- (2) 冷凝器出口工质、预热器出口工质、蒸发器出口工质均为饱和状态;
- (3) 膨胀机、工质泵的等熵效率和机械效率为定值;
- (4) 发电机发电效率为定值;
- (5) 忽略蒸发器、冷凝器、管道及附件中的压力损失。

1.3 数值模型

- (1) 膨胀机 1

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2,s})\eta_{exp,s} \quad (1)$$

$$W_{exp1} = m_{wf1}(h_1 - h_2)\eta_{exp} \quad (2)$$

(2) 膨胀机 2

$$h_2 = h_1'' - (h_1'' - h_{2,s})\eta_{exp,s} \quad (3)$$

$$W_{exp2} = m_{wf2}(h_1'' - h_2)\eta_{exp} \quad (4)$$

(3) 冷凝器

$$Q_{cond} = m_{wf}(h_2 - h_3) \quad (5)$$

$$m_{cw} = \frac{Q_{cond}}{c_p(t_n - t_m)} \quad (6)$$

$$W_{cond} = m_{cw}\Delta P_{cwpump}/(\eta_{cwpump}\rho_{cw}) \quad (7)$$

(4) 工质泵 1

$$h_{4'} = h_3 + (h_{4',s} - h_3)/\eta_{pump,s} \quad (8)$$

$$W_{pump1} = m_{wf1}(h_{4'} - h_3)/(\eta_{pump}\rho_{wf}) \quad (9)$$

(5) 工质泵 2

$$h_{4''} = h_3 + (h_{4'',s} - h_3)/\eta_{pump,s} \quad (10)$$

$$W_{pump2} = m_{wf2}(h_{4''} - h_3)/(\eta_{pump}\rho_{wf}) \quad (11)$$

(6) 预热器 1

$$Q_{pre1} = m_{wf1}(h_{5'} - h_{4'}) \quad (12)$$

$$m_{hw'} = \frac{Q_{pre1}}{h_{a'} - h_{b'}} \quad (13)$$

(7) 预热器 2

$$h_{b''} = \frac{m_{hw}h_c - m_{hw'}h_{b'}}{m_{hw} - m_{hw'}} \quad (14)$$

$$Q_{pre2} = (m_{hw} - m_{hw'})(h_{a''} - h_{b''}) \quad (15)$$

$$m_{wf2} = \frac{Q_{pre2}}{h_{5''} - h_{4''}} \quad (16)$$

(8) 蒸发器 1

$$t_{5'} = t_{a'} - t_{pin} \quad (17)$$

$$Q_{evap1} = m_{hw}(h_a - h_{a'}) \quad (18)$$

$$m_{wf1} = \frac{Q_{evap1}}{h_1 - h_{5'}} \quad (19)$$

(9) 蒸发器 2

$$t_{5''} = t_{a''} - t_{pin} \quad (20)$$

$$Q_{evap2} = (m_{hw} - m_{hw'})(h_{a''} - h_{a''}) \quad (21)$$

$$m_{wf2} = \frac{Q_{evap2}}{h_1'' - h_{5''}} \quad (22)$$

SFD-ORC 系统的净输出功如式 (23) 所示:

$$W_{net,SFD-ORC} = W_{exp1} + W_{exp2} - W_{cond} - W_{pump1} - W_{pump2} \quad (23)$$

上述公式中, m 为质量流量, kg/s; 下标 hw 表示入口热水质量流量, hw' 表示分流热水质量流量, wf_1 表示高压循环中工质质量流量, wf_2 表示低压循环中工质质量流量, cw 表示冷水质量流量; h 为焓值, kJ/kg; h 下标 1, 1', 1'', 2, 2', 3, 4', 4'', 5', 5'', $a, a', a'', b, b', b'', c$ 表示各状态点的焓值; $h_{2,s}$ 表示等熵条件下的 2 状态点焓值, $h_{4',s}$ 表示等熵条件下的 4' 状态点焓值, $h_{4'',s}$ 表示等熵条件下的 4'' 状态点焓值; Q 为换热量, kJ; 下标 $cond$ 表示冷凝器换热量, $pre1$ 表示预热器 1 换热量, $pre2$ 表示预热器 2 换热量, $evap1$ 表示蒸发器 1 换热量, $evap2$ 表示蒸发器 2 换热量; t 为温度, °C; t 下标 $m, n, 5', a', 5'', a''$ 表示该状态点温度, t_{pin} 表示蒸发器夹点温差; η_{exp} 为膨胀机机械效率; $\eta_{exp,s}$ 为膨胀机等熵效率; η_{cwpump} 为工质泵等熵效率, ρ_{cw} 为冷水密度, kg/m³; ρ_{wf} 为工质密度, kg/m³; c_p 为定压比热容, kJ/(kg·°C); ΔP_{cwpump} 为冷水泵扬程, m; W 为做功量, kW; 下标 $exp1$ 表示膨胀机 1 发电量, $exp2$ 表示膨胀机 2 发电量, $cond$ 表示冷水泵耗功量, $pump1$ 表示工质泵 1 耗功量, $pump2$ 表示工质泵 2 耗功量。

将上述理论通过编程进行数值模拟。模拟中所需参数表 1 所示, 选用模拟的有机工质为 R245fa, 模拟中的物性参数调用 Refprop 程序, 模拟软件选用 matlab。

表 1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值	单位
环境温度	25	°C
环境压力	101.3	kPa
热水质量流量	111.1	kg/s
热水入口温度	90-130	°C
夹点温差	3	°C
工质泵等熵效率	70%	—
工质泵机械效率	75%	—
冷水泵等熵效率	80%	—
冷水泵机械效率	90%	—

膨胀机等熵效率	85%	—
膨胀机机械效率	95%	—

2 粒子群优化算法

粒子群算法是通过模拟鸟群捕食行为设计的一种群智能算法。应用粒子群算法对 SFD-ORC 进行优化的步骤如下:

第一步: 对粒子群算法运行参数进行设置, 设置粒子个数和最大迭代次数;

第二步: 规定变量变化区间, 变量包括高压蒸发器 1 出口热水温度 t_a 和热水出口温度 t_c , 其中, t_a 随热水入口温度的变化而变化, 不同热水入口温度下独立变量变化范围如表 2 所示;

第三步: 以净输出功计算函数作为目标函数, 计算种群中每个个体的净输出功 $W_{net,SFD-ORC}$, 计算净输出功越高, 适应度越高;

第四步: 对每个粒子, 用他的适应度值 $W_{net,SFD-ORC}$ 和该个体出现历史最大净输出功 $Pbest_i$ 位置的比较, 如果这个粒子适应度大, 将这个粒子位置向量替换为 $Pbest_i$ 位置的向量;

第五步: 对每个粒子, 用他的适应度值 $W_{net,SFD-ORC}$ 和所有个体中出现最大净输出功 $Gbest$ 位置的比较, 如果这个粒子适应度大, 将这个粒子的位置向量替换为 $Gbest$ 位置向量;

第六步: 通过粒子的速度和位置计算公式重新计算粒子速度和位置向量;

其中速度向量迭代公式:

$$V_{i+1} = wV_i + c_1r_1(Pbest_i - X_i) + c_2r_2(Gbest - X_i) \quad (24)$$

式中, $Pbest_i$ 和 $Gbest$ 分别代表粒子 i 的历史最佳位置向量和种群历史最佳位置向量。参数 w 称为是 PSO 的惯性权重, 它的取值介于 [0,1] 区间, 一般应用中均采用自适应的取值方法, 即一开始令 $w=0.9-1$, 使得 PSO 全局优化能力较强, 随着迭代的深入, 参数 w 进行递减, 从而使得 PSO 具有较强的局部优化能力。参数 c_1 和 c_2 称为是学习因子, 设置为 2; 而 r_1 和 r_2 为介于 [0,1] 之间的随机概率值。

位置向量迭代公式:

$$X_{i+1} = X_i + V_i \quad (25)$$

第七步: 对新产生的所有粒子计算适应度, 根据适应度与历史最佳位置和全局最佳位置进行比

较, 如果粒子净输出功大于历史最大净输出功或全局最大净输出功, 再对历史最佳位置或全局最大位置进行更新;

第八步: 根据是否达到最大迭代次数判断继续进行迭代, 还是找出所有粒子中净输出功最高个体作为解返回并结束程序, 输出优化 t_a 、 t_c 的和最大净输出功。

3 结果与讨论

3.1 独立变量分析

根据之前的研究^[18], 设计 ORC 系统时, 净输出功与热水入口温度、热水流量、蒸发温度、夹点温差、冷凝温度这一系列参数有关, 但是经过对理论模型的建立和假设, 可以得出在热水入口温度、热水流量、夹点温差确定时, 只需要知道热水出口温度和经过高压蒸发器换热后的热水温度, 就可以通过质量守恒和能量守恒定律从而计算出各循环的蒸发温度, 而冷凝温度与冷水温度有关, 在设计工况时, 常常认为是个给定值, 因此, 影响 SFD-ORC 系统净输出功的独立变量可由公式 (26) 表示。

$$W_{net,SFD-ORC} = f(t_a, t_c) \quad (26)$$

3.2 粒子群算法优化过程

以热水入口温度为 100℃ 为例进行粒子群算法优化, 粒子个数设置为 10, 30, 50, 最大迭代次数设置为 10 次优化过程如图 3 所示, 结果发现随着粒子数的增多, 获得最大净输出功的迭代次数越小, 这是由于粒子群算法具有记忆性, 粒子个数越多越容易找到最大净输出对应的位置向量, 从而更容易达到收敛。因此本文采用 30 个粒子迭代 10 次作为粒子群算法的设置参数进行计算, 既可以减少计算时间, 也可以达到优化收敛的目的。

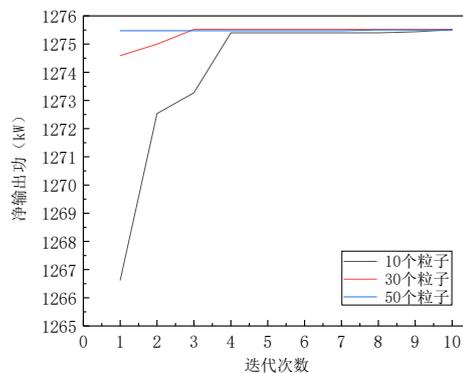


图3 粒子个数对最大净输出功的影响

Fig.3 Influence of particle number on maximum net power output

3.3 算法验证

以文献[19]中热水流量 1167t/h 为例, 将粒子群算法计算结果与文献中遗传算法计算结果进行验证, 得到结果如图 4 所示, 结果证明粒子群算法的计算结果时正确的并且达到优化的作用。

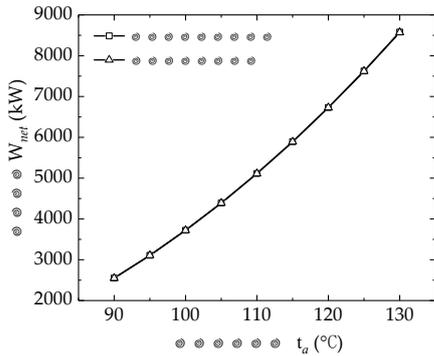


图4 粒子群算法验证结果

Fig.4 Validation results of particle swarm optimization algorithm

3.4 优化结果

3.4.1 优化独立变量

经过优化后得到的优化独立变量结果如图 5 所示, 可以发现高温蒸发器热水出口温度 t_a' 是与热水入口温度和蒸发器中热水温度降有关的参数, 通过计算可以发现得出高温蒸发器的热水温度降在随着热水入口温度的升高而不断升高。而优化的热水出口温度随着热水入口温度的升高几乎保持在 55°C 的附近, 且升高缓慢, 说明了热水的分流可以使热水的热量充分利用。

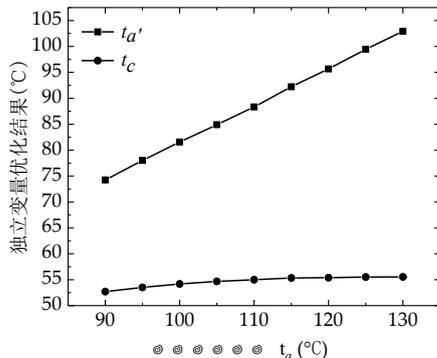


图5 热水入口温度 t_a 对独立变量的影响

Fig.5 The effect of hot inlet temperature t_a on the independent parameters

3.4.2 优化系统参数

系统蒸发温度和热水分流比可以通过优化后的独立变量代入数值模型中进行求解, 得到的蒸发温度包括高压循环蒸发温度和低压循环蒸发温度, 结果如图 6 所示, 可以发现蒸发温度随着热水入口温度的升高而升高, 且高压循环中蒸发温度从热水入口温度 90°C-130°C 的区间内升高了 28.7°C, 而低压循环蒸发温度只升高了 14.9°C。

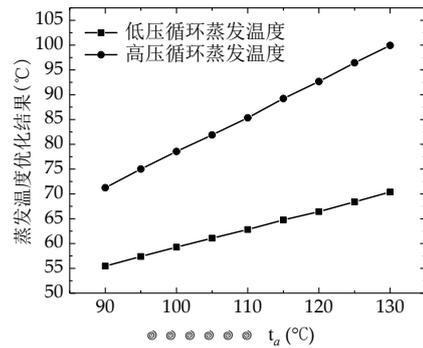


图6 热水入口温度 t_a 对蒸发温度的影响

Fig.6 The effect of hot inlet temperature t_a on the evaporation temperature

热水分流比定义为流入低压循环的热水与系统入口总热量之比。热水分流比计算结果如图 7 所示。随着热水入口温度升高, 分流进入低压循环预热器和蒸发器的热量在不断减少, 说明热水入口温度较低时, 大量热源进入低压循环可以获得更高净输出功, 而在热水入口温度高时, 少量热源进入低压循环就可以获得更高净输出功。同时热水的分流比证明了热水在不同热水入口温度时的适配性不同, 不同的热水入口温度更适合匹配不同蒸发压力下的热量, 因此会出现分流比的变化。

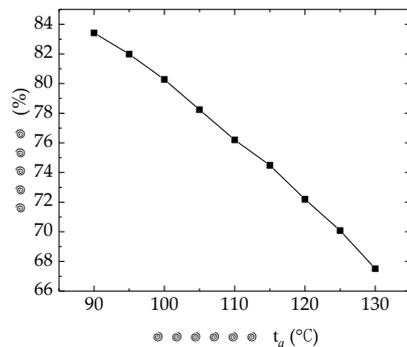


图7 热水入口温度 t_a 对热水分流比的影响

Fig.7 The effect of hot inlet temperature t_a on the hot water split ratio

3.4.3 优化净输出功

系统净输出功随热水入口温度的变化如图 8 所示, 系统净输出功随着热水入口温度的升高而线性升高, 且增长率在不断升高, 热水入口温度在 90–95℃时平均每升高 1℃, 净输出功增长 38.27kW。热水入口温度在 125–130℃时平均每升高 1℃, 净输出功增长 65.43kW。证明该系统在热水入口温度更高时有更大优势。经优化后, 以 100℃的工业余热为例, 出口温度为 40℃时, 发电效率约为 6.7%。

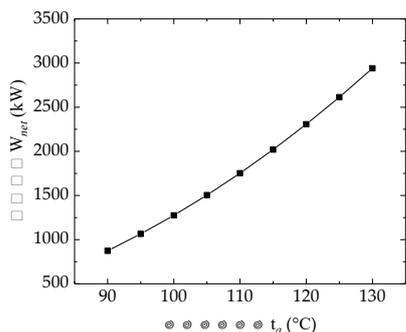


图 8 热水入口温度 t_a 对净输出功的影响

Fig.8 The effect of hot inlet temperature t_a on the net output power

4 结论

本文针对煤制油技术所产生的工业低温热水, 建立了热水分流的双压有机朗肯循环的数值模型, 分析了影响热水分流的双压有机朗肯循环系统净输出功的独立变量, 并通过粒子群算法对系统独立变量进行优化计算, 得到了以下几点结论:

(1) 影响热水分流双压有机朗肯循环系统净输出功的独立变量主要包括: 高压蒸发器出口热水温度和系统出口热水温度。

(2) 优化的蒸发温度中, 高压循环蒸发温度升高更快。热水在进行分流的过程中随着热水入口温度的升高分流比下降。热水分流比对不同的蒸发压力具有适配性。

(3) 系统净输出功随着热水入口温度升高而升高, 且热水温度更高时采用该系统更有优势。

参考文献:

[1] 英国石油公司.世界能源统计[M].伦敦:世界能源统计年鉴,2019:4-15.
[2] 曹然.煤制油技术的竞争力分析[D].北京:中国石油大

学,2017.
[3] 杨葛灵.中国神华煤制油发展战略研究[D].上海:华东理工大学,2013.
[4] Li T, Zhang Z, Lu J, et al. Two-stage evaporation strategy to improve system performance for organic Rankine cycle[J]. Applied Energy, 2015,150:323-334.
[5] Li T, Yuan Z, Li W, et al. Strengthening mechanisms of two-stage evaporation strategy on system performance for organic Rankine cycle[J]. Energy, 2016,101(Apr.15): 532-540.
[6] Li T, Meng N, Liu J, et al. Thermodynamic and economic evaluation of the organic Rankine cycle (ORC) and two-stage series organic Rankine cycle (TSORC) for flue gas heat recovery[J]. Energy Conversion & Management, 2019,183(MAR.):816-829.
[7] 李太禄.中低温地热发电有机朗肯循环热力学优化与实验研究[D].天津:天津大学,2013.
[8] Mortaza Yari. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants[J]. Renewable Energy, 2010.
[9] Li J, Ge Z, Duan Y, et al. Parametric optimization and thermodynamic performance comparison of single-pressure and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles[J]. Applied Energy 2018,217:409-421.
[10] Yu X, Li Z, Lu Y, et al. Investigation of an Innovative Cascade Cycle Combining a Trilateral Cycle and an Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) for Industry or Transport Application[J]. Energies, 2018,11(11).
[11] 李岩岩.带蓄热的太阳能有机朗肯循环热电联产系统研究[D].北京:北京石油化工学院,2019.
[12] Xi H, Li M J, Xu C, et al. Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm[J]. Energy, 2013,58(SEP.1):473-482.
[13] Palagi L, Sciubba E, Tocci L. A neural network approach to the combined multi-objective optimization of the thermodynamic cycle and the radial inflow turbine for Organic Rankine cycle applications[J]. Applied Energy, 2019,237(MAR.1):210-226.
[14] Kim J S, Kim D Y, Kim Y T. Experiment on Radial Inflow Turbines and Performance Prediction using Deep Neural Network for the Organic Rankine Cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 149.

-
- [15] Ochoa G V, Carlos Acevedo Peñaloza, Forero J D. Thermoeconomic Optimization with PSO Algorithm of Waste Heat Recovery Systems Based on Organic Rankine Cycle System for a Natural Gas Engine[J]. Energies, 2019,12. (下转第77页)