

文章编号:0254-0096(2018)02-0482-09

太阳能有机朗肯循环系统性能分析及综合评价

顾煜炯, 耿 直, 谢 典

(华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206)

摘 要: 针对中低温太阳能热源, 采用低沸点的有机工质作为动力循环进行发电。在满足环保、安全及热物性的要求下, 采用15种有机工质作为循环工质, 根据热力学第一、第二定律, 建立亚临界热力系统数学模型, 采用窄点温差分析法, 分别从热效率、烟效率、膨胀比、环境烟代价等角度对比分析其循环特性。考虑多方面因素, 利用层次分析法构建多指标能效综合评价模型。经过模拟计算, 结果表明: 甲苯(toluene)作为本系统循环工质的性能较优。

关键词: 太阳能; 朗肯循环; 工质; 热分析; 烟; 能效; 最佳

中图分类号: TK11⁺4; TK123 **文献标识码:** A

0 引 言

太阳能热利用是一种新兴的可再生能源利用技术, 具有总能量巨大、无污染, 但通量密度较低、间歇性等特点。按照介质被加热的温度等级可分为高温热利用(>573.15 K), 中低温利用(373.15~573.15 K)和低温利用(<373.15 K)。中国国家能源局2015年第355号文件明确指出, 从政策上支持太阳能热发电技术, 考虑到太阳能的能流密度较低、热源参数不高等特点, 可采用低沸点物质作为循环工质的有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)^[1-3]发电技术与之匹配, 以回收太阳能中低温热量, 这对于当今新能源的高效利用及节能减排具有重要意义。

近年来, 国内外学者在该方面开展了大量研究。Hung等^[4]选用苯、甲苯、对二甲苯、R113、R123等5种工质进行有机朗肯循环性能分析, 结果表明对于约200℃的低温热源, R123和R113的循环性能更优; Manolacos等^[5]采用R134a工质研究了基于ORC的太阳能海水淡化系统, 通过对系统各部件参数的设计及性能分析, 为海水淡化提供了环保新思路; Wang Jiangfeng等^[6]构建一套太阳能ORC冷热电三联供系统, 对其中太阳能复合抛物面集热器的

倾斜角及太阳时角对系统性能的影响进行了分析, 并使用系统烟效率作为目标进行了优化。

本文以中低温太阳能有机朗肯循环热发电系统为研究对象, 采用15种常见有机工质作为循环工质, 分别建立亚临界有机朗肯循环热力系统模型。为避免评价标准的单一性与不一致性, 采用窄点温差法, 结合熵值的层次分析法(AHP), 构建科学合理的系统能效综合评价体系。揭示系统运行参数的变化规律, 并对工质的筛选给出可行建议。

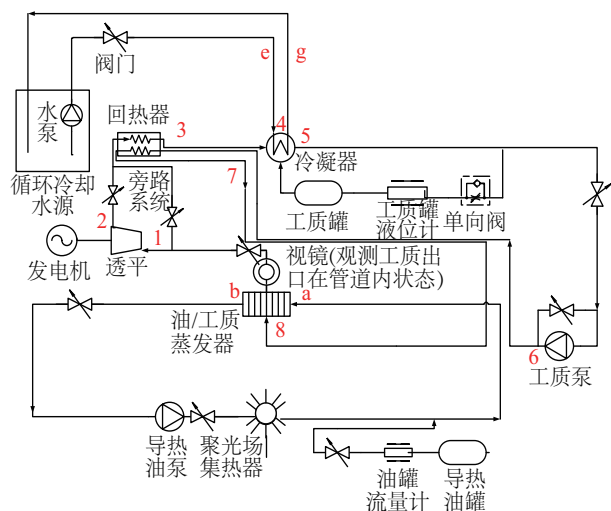
1 系统物理模型

太阳能有机朗肯循环热发电系统的物理结构示意图如图1所示。利用太阳能聚光系统捕捉太阳能, 聚焦集热加热传热介质导热油, 构成光场内部循环。导热油经过油/工质蒸发器, 与有机工质进行换热, 产生高温高压的蒸汽。有机工质蒸汽再依次通过有机工质透平、回热器、冷凝器、工质泵等器件, 构成ORC热功转换闭合循环系统, 并通过透平中气体膨胀做功带动发电机输出电能^[7]; 而冷端依靠循环水泵将冷却水输入到冷凝器中, 参与乏汽凝结换热。最终, 整个系统实现“光—热—功”的转换。

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 北京市自然科学基金(3172031); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016XS24)

通信作者: 顾煜炯(1968—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电站设备状态维修理论与技术、可再生能源的利用与开发等方面的研究。gyj@ncepu.edu.cn



有机工质侧：1. 透平入口 2. 透平出口 3. 回热器冷却段出口
4. 冷凝器入口 5. 冷凝器出口 6. 回热器预热段入口
7. 回热器预热段出口 8. 蒸发器入口
导热油侧：a- 蒸发器入口 b- 蒸发器出口
循环冷却水侧：c- 冷凝器入口 g- 冷凝器出口

图1 太阳能有机朗肯循环系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of ORC system powered by the solar energy

1.1 候选工质

低沸点 ORC 工质的选择,一般从工质热力循

环特性、环保性和安全性 3 个方面综合考虑。

由工质在 T - s 图中饱和气化线的形状,依据 $\frac{dT}{ds}$ 值可将工质分为 3 类^[8]:干流体($\frac{dT}{ds} > 0$)、湿流体($\frac{dT}{ds} < 0$)及等熵流体($\frac{dT}{ds} = 0$)。出于透平叶片安全的考虑,一般要求膨胀机出口干度大于 0.85。为满足最小干度要求,采用湿工质时需加设过热器。但是,等熵工质与干工质经透平做功后为过热或饱和状态,且过热器的设置又会增加系统复杂性,所以优选等熵与干流体。在环保性方面,主要考虑 2 个环保指标:臭氧耗损潜值(ozone depletion potential, ODP)和全球变暖潜值(global warming potential, GWP);对于类似氯氟烃(CFC)类淘汰产品,暂不考虑,应结合温室效应与臭氧层破坏问题优先考虑烷烃类工质^[9]。在安全性方面,美国采暖、制冷与空调工程师学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer, ASHRAE)的制冷剂安全分类表明了工质的危险程度,抗腐蚀、不易燃及低毒性的工质对有机朗肯循环而言最为适宜。综合考虑,对适合本系统使用的工质进行预选,得出以下 15 种候选工质,详见表 1

表1 候选工质热物性及环境特性参数

Table 1 Physical and environmental parameters of the alternative working fluid

工质名称	中文名称	工质类型	干湿性	摩尔质量/ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	标况下 沸点/K	临界 温度/K	临界 压力/MPa	ODP	GWP
benzene	苯	HC	干工质	78.108	353.23	562.05	4.894	0.00	20.00
cyclohexane	环己烷	HC	干工质	84.161	353.89	553.64	4.075	0.00	20.00
decane	正癸烷	HC	干工质	243.500	447.27	617.70	2.103	0.00	20.00
heptane	正庚烷	HC	干工质	100.200	371.53	540.13	2.736	0.00	20.00
dodecane	十二烷	HC	干工质	170.330	489.30	658.10	1.817	0.00	20.00
hexane	己烷	HC	干工质	86.175	341.86	507.82	3.034	0.00	20.00
isohexane	异己烷	HC	干工质	86.175	333.36	497.70	3.040	0.00	20.00
Isopentane (R601a)	异戊烷	HC	干工质	72.149	300.98	460.35	3.378	0.00	20.00
nonane	正壬烷	HC	干工质	128.260	423.91	594.55	2.281	0.00	20.00
octane	正辛烷	HC	干工质	114.230	398.77	569.32	2.497	0.00	20.00
Pentane (R601)	正戊烷	HC	干工质	72.149	309.21	469.70	3.370	0.00	20.00
R123	三氟二氯乙烷	HCFC	干工质	152.93	300.97	456.83	3.6618	0.02	93.00
R141b	一氟二氯乙烷	HCFC	等熵工质	116.950	305.20	477.50	4.212	0.11	0.09
R365mfc	五氟丁烷	HFC	干工质	148.070	313.30	460.00	3.266	0.00	840.00
toluene	甲苯	HC	干工质	92.138	383.75	591.75	4.1263	0.00	3.35

所示,其物性参数来源于美国 NIST (national institute of standards and technology) 实验室所开发的工质物性软件 Refprop。

1.2 系统模型

1.2.1 热力学模型

为简化系统,假定系统处于稳定流动状态,油/工质蒸发器、透平、回热器、冷凝器及管道的压力损失均忽略不计,系统外界无散热。由于透平出口工质排汽为过热状态,所以为避免产生能量的浪费和减小冷凝器的负荷,在太阳能发电热功转换系统中增加热回收器(如图 1 所示),以提高热量的回收效率。

根据有机朗肯循环原理(如图 2),对亚临界饱和 ORC 系统建立如下热力学模型。

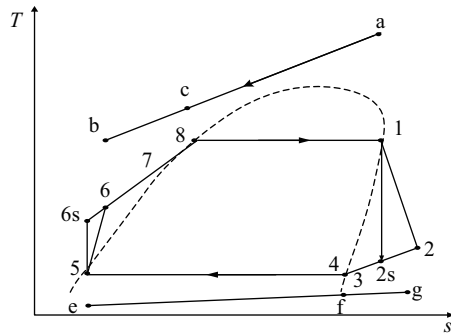


图2 有机朗肯循环原理图

Fig. 2 Organic Rankine cycle schematic diagram

1) 油/工质蒸发器

$$m_{zf}(h_a - h_c) = m_{gz}(h_1 - h_8) \quad (1)$$

$$m_{zf}(h_c - h_b) = m_{gz}(h_8 - h_7) \quad (2)$$

$$I_z = E_a - (E_1 - E_7) \quad (3)$$

式中, m_{zf} ——热媒介质导热油的质量流量, kg/s; m_{gz} ——循环工质的质量流量, kg/s; h_a 、 h_b 、 h_c ——导热油在蒸发器进口 a 点、出口 b 点及窄点 c 点各自的比焓, kJ/kg; h_1 、 h_7 、 h_8 ——有机工质在透平入口饱和气态 1 点、工质在回热器内被加热后出口 7 点及工质在蒸发器入口饱和液态 8 点各自比焓, kJ/kg; I_z ——工质蒸发器焓损失, kW; E_a ——导热油 a 点焓, kW; E_1 、 E_7 ——有机工质 1 与 7 点焓, kW。

ORC 系统循环吸热量:

$$Q_z = m_{zf}(h_a - h_b) = m_{gz}(h_1 - h_7) = m_{zf}c_p(t_a - t_b) \quad (4)$$

式中, Q_z ——油/工质蒸发器中有机工质的吸热功率, kW; c_p ——导热油比热容, kJ/(kg·K); t_a 、 t_b ——导热油在蒸发器进、出口的温度, K。

2) 透平

$$W_T = m_{gz}(h_1 - h_2) \quad (5)$$

$$I_w = (E_1 - E_2) - W_T \quad (6)$$

式中, W_T ——透平输出功, kW; I_w ——透平焓损失, kW; E_1 、 E_2 ——工质透平进、出口焓, kW; h_2 ——工质透平出口比焓, kJ/kg。

3) 回热器

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{t_2 - t_3}{t_2 - t_6} \quad (7)$$

$$m_{gz}(h_2 - h_3) = m_{gz}(h_7 - h_6) \quad (8)$$

$$I_h = (E_2 - E_3) - (E_7 - E_6) \quad (9)$$

式中, ε_{int} ——回热器的效能, 范围[0, 1]; t_2 、 t_3 、 t_6 ——工质 2、3、6 各点温度, K; h_3 、 h_6 ——工质 3、6 两点比焓, kJ/kg; I_h ——回热器焓损失, kW; E_3 、 E_6 、 E_7 ——工质回热器冷却段出口 3 点、回热器预热段入口 6 点、回热器预热段出口 7 点各焓值, kW。

4) 冷凝器

$$m_{gz}(h_3 - h_4) = m_s(h_g - h_f) \quad (10)$$

$$m_{gz}(h_4 - h_5) = m_s(h_f - h_e) \quad (11)$$

$$I_l = E_3 - E_5 \quad (12)$$

式中, h_3 、 h_4 、 h_5 ——工质回热器冷却段出口 3 点、冷凝器入口 4 点与出口 5 点各自比焓, kJ/kg; m_s ——循环冷却水流量, kg/s; h_g 、 h_f 、 h_e ——循环冷却水冷凝器出口 g 点、窄点处 f、入口 e 点各比焓, kJ/kg; I_l ——冷凝器焓损失, kW; E_5 ——冷凝器出口工质 5 点焓, kW。

5) 工质泵

$$W_p = m_{gz}(h_6 - h_5) \quad (13)$$

$$I_p = E_1 - E_2 - W_T \quad (14)$$

式中, W_p ——泵耗功, kW; I_p ——工质泵焓损失, kW。

6) 系统效率指标

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_z} = \frac{W_T - W_p}{Q_z} \quad (15)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{W_{\text{net}}}{E} = \frac{\eta}{1 - \frac{\bar{T}_{\text{放热}}}{\bar{T}_{\text{吸热}}}} \quad (16)$$

式中, η ——ORC 系统热效率, %; η_{ex} ——ORC 系

统炯效率,%; W_{net} ——ORC 系统输出净功量, kW;
 E ——ORC 系统总炯值, kW; $\bar{T}_{\text{放热}}$ 、 $\bar{T}_{\text{吸热}}$ ——ORC 系
 统工质循环平均放热与平均吸热温度, K。

本文采用有限尺寸法^[10], 对工质蒸发器、回热器、冷凝器的传热系数与传热面积 UA 进行计算。蒸发器分为预热段与蒸发段, 冷凝器划分为过热段与冷凝段。其中, UA 越大, 所需传热面积越大, 投资成本也越高, 因此 UA 可作为 ORC 经济性评价的一个重要指标, 公式如式(17)~式(20)所示。

$$Q_i = m_1(h_{gi} - h_{gi-1}) \quad (17)$$

$$Q_i = m_2(h_{yi} - h_{yi-1}) \quad (18)$$

$$Q_i = (UA)_i \Delta t \quad (19)$$

$$\Delta t = \frac{T_{yi} + T_{yi-1}}{2} - \frac{T_{gi} + T_{gi-1}}{2} \quad (20)$$

式中, Q_i ——不同换热器换热过程中各段换热功率, kW; m_1 、 m_2 ——第 i 段换热中低温侧与高温侧流体相应质量流量, kg/s; h_{yi} 、 h_{gi} ——第 i 换热段高温侧与低温侧流体对应比焓, kJ/kg; t ——温度, K; T_{yi} 、 T_{gi} ——第 i 换热段高温侧与低温侧相应点各温度, K。

1.2.2 ORC 系统对环境影响炯模型

由于在整个系统中有许多管道、法兰等存在, 因此有机工质不可避免地会在运行中会产生泄露, 而有机工质一旦泄露, 必然对环境造成一定程度破坏。且整个循环中又可能伴随有不同的泄露方式, 如等温泄露与绝热泄露^[11]等多个泄露点。为简化泄露量计算, 本文将可能存在的多种泄露方式和泄露点整合为一体进行综合考虑, 并依据欧盟 F-Gas 法则相关规定^[12], 取系统的泄露率为 $r=3\%$, 将泄露工质对环境的影响处理成对环境无任何影响时所需炯值, 定义为环境的炯代价。其计算公式如式(21)~式(23), 其中工质的环境影响炯因子^[13]如表 2 所示。

$$E_{\text{cost}, GWP} = r \times m_{\text{zi}} \times GWP \times E_{\text{f}, GWP} / T_{\gamma} \quad (21)$$

$$E_{\text{cost}, ODP} = r \times m_{\text{zi}} \times ODP \times E_{\text{f}, ODP} / T_{\gamma} \quad (22)$$

$$E_{\text{cost}} = E_{\text{cost}, GWP} + E_{\text{cost}, ODP} \quad (23)$$

式中, $E_{\text{cost}, GWP}$ 、 $E_{\text{cost}, ODP}$ ——分别处理 GWP 和 ODP 对环境影响所需的炯代价, kW; E_{cost} ——环境炯代价, kW; $E_{\text{f}, GWP}$ 、 $E_{\text{f}, ODP}$ ——环境影响炯因子; r ——系统泄露率; T_{γ} ——系统年运行时间, h。

表 2 环境影响炯因子

Table 2 Exergy factor of influencing the environment

名称	GWP	ODP
环境影响 炯因子/ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	5.86	1226.27

2 结果讨论及性能分析

本文采用窄点温差分析法^[14], 表 3 为设定计算的初始条件。热源选取太阳能集热器内加热的单位质量流量 THERMINOL 55 号导热油, 通过 Matlab 编程与 Refprop 物性软件调用进行计算。

表 3 系统计算参数设定值

Table 3 Parameters preset value for system calculation

参数	设定值
泵等熵效率/%	90
透平相对内效率/%	80
工质蒸发器处热源入口导热油油温/K	473.15
循环冷却水进口温度/K	298.15
工质冷凝温度/K	308.15
环境温度/K	298.15
工质蒸汽器的窄点温差/K	5
冷凝器的窄点温差/K	5
系统年运行时间/h	1000

2.1 热力学性能

图 3 给出了不同工质作为动力循环时 ORC 系统的净输出功随蒸发温度变化而变化的情况。15 种工质均呈现出大体一致的变化趋势: 净输出功随着蒸发温度的升高先增大后减小, 且存在一个最佳蒸发温度 $t_{\text{op}, \text{zi}}$, 使得各工质在此蒸发温度下净输出功最大。而 ORC 系统的净输出功主要取决于透平的输出功与工质泵的耗功之差。分析可知, 在工质蒸发温度 (t_{zi}) < 最佳蒸发温度 ($t_{\text{op}, \text{zi}}$) 时, 随着蒸发温度的变大, 透平进出口焓值的差值增幅大于有机工质大于有机工质质量减少的幅度, 从而使得透平输出功随着蒸发温度的增大而增大。相较于工质泵耗功, 透平输出功占据主导地位。因此, 系统的净输出功也随之而增大; 当 $t_{\text{zi}} > t_{\text{op}, \text{zi}}$ 时, 变化规律恰好相反。其中, 在 $t_{\text{zi}} < 424.15 \text{ K}$ 范围内, R365mfc 净输出功比其他工质都大, isopentane 次之, benzene 最小。当 $t_{\text{zi}} = 424.15 \text{ K}$ 时, R365mfc 净输出功达到最大

值 45.64 kW。之后在 $t_{d1} > 448.15$ K 时, R123 趋势变化相反, 由减变增, 存在最小输出功 33.34 kW。这主要因为 R123 工质自身物性决定, 蒸发参数临近其临界参数而变化的结果。

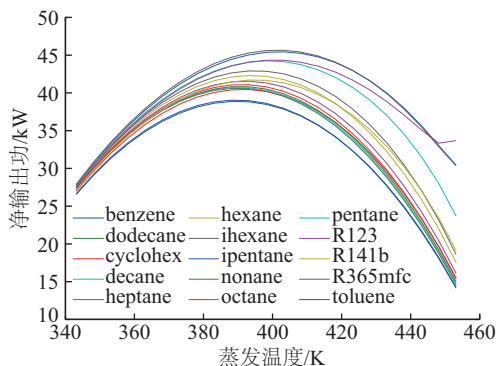


图3 蒸发温度对净输出功的影响

Fig. 3 Effect of evaporation temperature for net output power

图 4 给出了不同工质热效率随着蒸发温度的变化趋势。大部分工质的循环热效率随着蒸发温度的升高而增大。在研究温度范围内, toluene 热效率最大, R123 最小。以 toluene 为例, $t_{d1} = 343.15$ K 时, 热效率为 7.71%; 当 $t_{d1} = 453.15$ K 时, 热效率升高至 22.05%。这是因为随着蒸发温度的升高, 单位工质净功量与吸热量均随之增大, 当净功量的增加份额大于吸热量的增加份额时, 热效率便增大。其中, 当温度大于 448.15 K 时, R123 的热效率出现减小趋势。说明在此工作区间, R123 净功量的增加份额(与图 3 分析一致)小于吸热量的增加份额, 导致系统热效率降低。

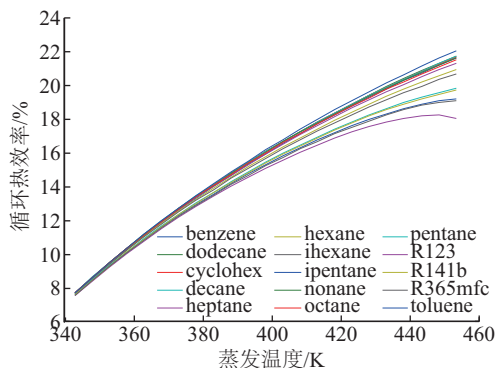


图4 蒸发温度对热效率的影响

Fig. 4 Effect of evaporation temperature for thermal efficiency

图 5 给出了蒸发温度对炯效率的影响。经计算发现, ORC 系统部件中油/工质蒸发器的不可逆损失最大, 其次是冷凝器与透平, 回热器与工质泵

的炯损最小。炯损的存在主要因为蒸发器与热源之间的温差存在。由图可知, 随着蒸发温度的升高, 占据炯损最大的蒸发器与导热油热源的换热温差减小, 不可逆损失减小。因此, 整个系统的炯效率呈现增大的趋势。当以炯效率为单一目标函数时, 在蒸发温度不太高时, 适宜采用 R365mfc 或 isopentane, 炯效率较高; 而在蒸发温度较高时, toluene 与 cyclohexane 的炯效率特性表现更好。

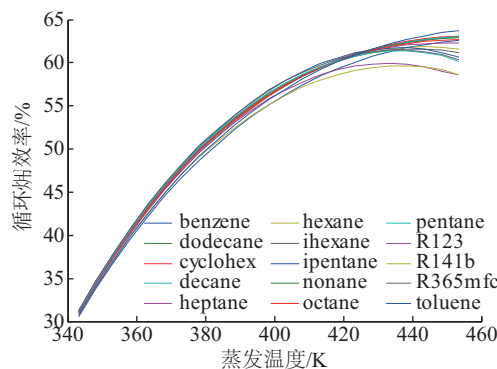


图5 蒸发温度对炯效率的影响

Fig. 5 Effect of evaporation temperature for exergy efficiency

膨胀比是评价系统做功能力的重要指标之一, 它从某种程度上体现工质热力性能优劣; 该值越大, 单位质量流量工质的做功量越大。图 6 给出了各个工质的膨胀比随着蒸发温度的变化规律。蒸发温度升高, 工质的膨胀比基本均逐渐增大, 但是各个工质的增幅不同。dodecane 的增幅尤为明显, 且膨胀比值一直保持最大; decane 次之, isopentane 最小, 基本维持不变。整体来看, HC 类压比普遍较高。单从压比来看, dodecane 显示较强的做功能力。

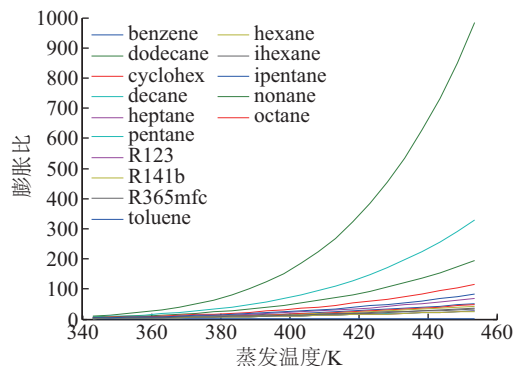


图6 蒸发温度对膨胀比的影响

Fig. 6 Effect of evaporation for expansion ratio

2.2 经济性

净功、热效率、炯效率与膨胀比 4 项指标主要

从热力学角度对所有工质性能做对比。而对于 ORC 系统,投资、成本等经济性也是评价系统性能优劣的重要因素。本文选取循环工质质量流量和传热系数与换热面积之积 UA 值 2 个指标对比分析。图 7 与图 8 分别给出了二者随蒸发温度的各自变化规律。循环工质质量流量越小,其做功能力越强,所需流通面积也越小,成本越低;对于给定的换热器,传热系数 U 为定值,所以 UA 越小,所需传热面积越小,经济性也越好。由图 7 可知,随着蒸发温度的升高,循环工质质量流量逐渐减小。R123 单位功量所需质量流量最大,经济性较差,且在整个计算区域内保持不变。而当 $t_d < 445.15$ K 时,benzene 的循环工质质量流量最小。之后,toluene 较小。当 $t_d = 453.15$ K,甲苯的质量流量 m_{toluene} 为 0.11697 kg/s,三氟二氯乙烷的质量流量 m_{R123} 为 0.89018 kg/s,二者相差约 7.6 倍。图 8 则从 UA 值变化来反映经济性。随着蒸发温度升高, UA 值不断

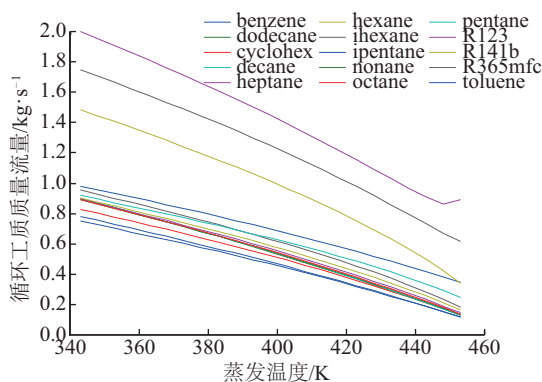


图 7 蒸发温度对循环工质质量流量的影响

Fig. 7 Effect of evaporation for mass flow rate of cycle working substance

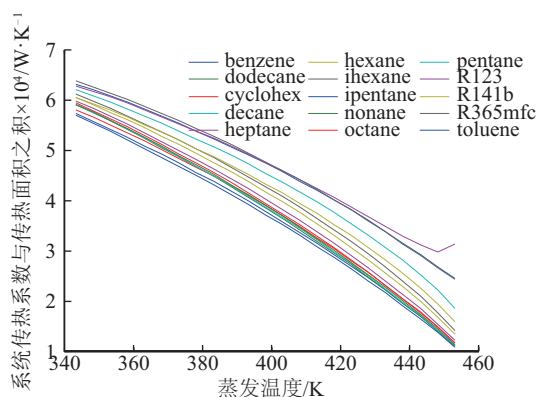


图 8 蒸发温度对 UA 的影响

Fig. 8 Effect of evaporation for UA values

减小,且各工质 UA 值越来越接近。只有 R123 在 448.15 K 时出现增大趋势,即在所研究范围内,R123 出现最小值 29732.32 W/K。

2.3 环保性

图 9 给出了环境焓代价随蒸发温度的变化规律。环境焓代价指工质泄漏对环境无任何影响时所需的焓值,它采用全球变暖潜值(GWP)与臭氧耗损潜值(ODP)2 个指标定量关系显示出工质的环保性能,用 E_{cost} 表示。 E_{cost} 值越小,说明工质对环境更加友好。由图可知,工质的焓代价均随着蒸发温度的升高而降低。其中,在 $343.15 \sim 453.15$ K 的蒸发温度范围内,R365mfc 的焓代价最大,降幅也最大,五氟丁烷的环境焓代价值 $E_{\text{cost,R365mfc}}$ 从 0.2576 kW 降至 0.0910 kW。R123 次之,benzene 最小。其他烷烃类工质由于 GWP 与 ODP 值基本变化不大,因此变化趋势基本一致。

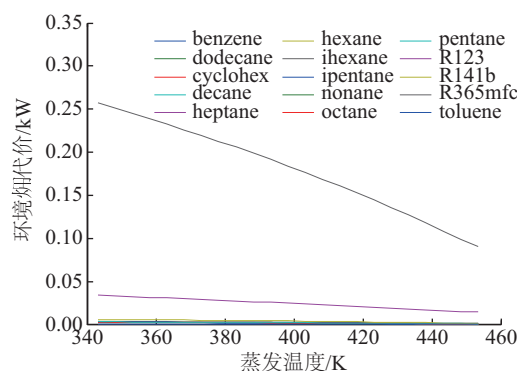


图 9 蒸发温度对环境的影响

Fig. 9 Effect of evaporation for environment

3 综合指标评价

以上分别从热力学、经济性、环保性 3 个方面对工质的循环特性进行了分析。由于忽视了其他因素对 ORC 系统性能的影响,单一指标评价会使得评价结果具有片面性。本文从整个系统角度出发,采用层次分析法(the analytic hierarchy process, AHP)将三者统筹起来,综合考虑这 3 个方面对系统性能的影响。AHP 系统评价法中最为关键的就是权重因子的确定问题。熵值法是根据所有评价指标所提供的信息量大小来确定各自权重的一种方法,即某项评价指标的差异性越大,其对应的熵值越小,也就说明该项指标所能提供的信息量越多,因此对应的权重因子也越大。本文对整个系统

进行主观分析,与从 7 个指标中某一指标计算值之间的差异性来确定其权重的客观方法相结合,更加全面地对各类工质性能进行综合分析。

1) 指标数据处理

在太阳能 ORC 系统综合评价结构指标层的评价指标构成的矩阵 X 中, x_{ij} 表示第 i 种蒸发温度 ($i=1,2,3,\dots,23$; 对应 343.15~453.15 K 的蒸发温度范围) 下第 j 项指标的数值 ($j=1,2,\dots,7$), 且满足 x_{ij} 均为正数。且在上述 7 项指标中, 净输出功、热效率、焓效率、膨胀比为极大型指标, 值越大越好; 而循环工质质量流量、 UA 值、环境焓代价三项均为极小型指标, 值越小越好。因此, 先进行指标一致化处理, 利用式 (24) 将极小型指标转化为极大型指标。一致化处理, 由于 7 项指标之间量纲及数值间数量级均不同, 存在不可公度性, 因此再采用式 (25)、式 (26) 分别将极大型与极小型指标归一化、规范化处理。

$$x_{ij}^* = \frac{1}{x_{ij}} (x_{ij} \neq 0) \quad (24)$$

式中, x_{ij}^* ——评价指标矩阵中极小型指标经过转化后得到的极大型指标值; x_{ij} ——评价指标矩阵中的元素值, $i=1\sim 23$, $j=1\sim 7$ 。

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{23} x_{ij}} (x_{ij} \neq 0, \sum_{i=1}^{23} x_{ij} > 0) \quad (25)$$

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^{23} x_{ij}^*} (x_{ij} \neq 0, \sum_{i=1}^{23} x_{ij}^* > 0) \quad (26)$$

式中, d_{ij} ——数据归一化处理后的元素值, $0 < d_{ij} < 1$, $\sum_{i=1}^{23} d_{ij} = 1$ 。

2) 权重因子的确定

经过上述数据处理后, 采用熵值法确定各指标的权重。第 j 项指标熵值按式 (27) 计算, 再求出 x_{ij} 的差异性系数, 最终得到归一化权重系数。具体如式 (27)~式 (29) 所示, 每种有机工质的综合评价指标 ξ 由式 (30) 计算而得。

$$e_j = -\sum_{i=1}^{23} d_{ij} \ln(d_{ij}) \quad (27)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (28)$$

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^7 g_j}, \quad j=1,2,\dots,7 \quad (29)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^7 x_{ij} \times w_j, \quad i=1,2,\dots,23 \quad (30)$$

式中, e_j ——第 j 项指标的熵值; g_j ——差异性系

数; w_j ——归一化权重系数; ξ_i ——综合指标评价价值。

3) 综合评价结果及分析

图 10 给出了 15 种工质各自的评价指标值 ξ 随蒸发温度的变化情况。随着蒸发温度的升高, 工质的综合评价指标值也逐渐增大。其中 toluene 的增幅变化最大, 单调递增且一直保持最大, 甲苯的综合评价指标值 ξ_{toluene} 由 313.68 增至最大值 2048.48。而 R365mfc 变化趋势较为平缓, 且始终最小, 五氟丁烷的综合评价指标值 ξ_{R365mfc} 仅维持在 10~23 的范围。当 $t_{\text{ev}} < 388.15$ K 时, benzene 值次之; 当 388.15 K $< t_{\text{ev}} < 453.15$ K 时, dodecane 处于第二地位。其他工质综合指标值排序依次为 cyclohexane、decane、nonane、octane、heptane、hexane、pentane、isohexane、isopentane、R141b、R123。其中, 个别工质排序稍有变化, 但大体上出入不大。因此, 权衡多方面因素综合考虑, toluene 性能最优, R365mfc 较差, 大部分碳氢化合物类 (HC) 工质性能差别不是很大, 相较于氢氯氟烃类 (HCFC) 工质表现出更优的性能, 适宜于太阳能中低温热量的有效回收。

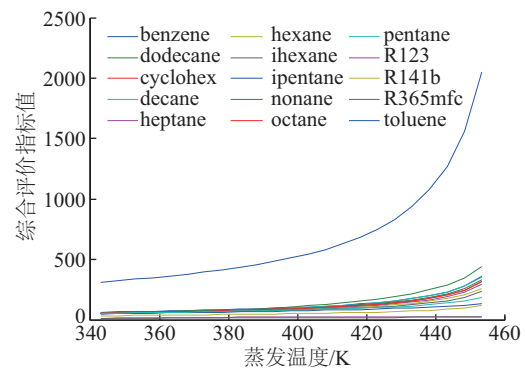


图 10 ORC 系统综合评价指标 ξ 随蒸发温度的变化情况

Fig. 10 The change of the comprehensive assessment indicators ξ along with the evaporation temperature

4 结 论

本文以 toluene、benzene、R123 等 15 种有机工质为研究对象, 采用 Matlab 和 Refprop 软件计算, 对太阳能驱动的中低温参数亚临界有机朗肯循环发电系统中的性能进行分析与综合评价, 得出以下结论:

1) 热力学方面, 各工质的净功随着蒸发温度升

高呈现先增后减的趋势,均存在一个最佳蒸发温度使其净功值最大。而热效率、炯效率和压比则均随蒸发温度的升高而增大,且大部分烷类工质的热效率和压比相对其他类工质较高。

2)经济性方面,各工质的单位功量质量流量与单位功量 UA 值均随蒸发温度升高而降低,且烷类工质所需质量流量远小于 HFC 和 HCFC 类工质。

3)环保性方面,环境炯代价这一指标可很好地定量分析各工质的环保性能,HC 类工质的 ODP 值基本为零,而 HCFC 类略高,对臭氧层有一定破坏;而 GWP 值方面,烷类工质凸显明显优势。总体来看,HC 类工质呈现出更好的环保特性。

4)综合三方面因素,采用 AHP,即熵权综合评价方法更加合理。烷类工质的综合特性明显优于 HFC 和 HCFC 类工质,且 toluene 具有较优性能,可作为太阳能 ORC 系统动力循环中较为理想的循环工质。其次,benzene 与 dodecane 也具有良好的性能。

[参考文献]

- [1] 汤磊,王羽平,杨平,等. 低品位热能超临界有机朗肯循环发电特性分析[J]. 动力工程学报, 2014, 34(08): 646—652.
- [1] Tang Lei, Wang Yuping, Yang Ping, et al. Analysis on characteristics of a supercritical ORC low-grade heat power generation system[J]. Journal of Power Engineering, 2014, 34(08): 646—652.
- [2] 顾伟,翁一武,王玉璋,等. 余热利用有机物朗肯循环最佳热回收效率分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 662—668.
- [2] Gu Wei, Weng Yiwu, Wang Yuzhang, et al. Heat recovery efficiency analysis of waste heat driven organic Rankine cycle[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(5): 662—668.
- [3] 王辉涛,王华,龙恩深,等. 低温废气余热驱动有机朗肯循环的优化[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1183—1189.
- [3] Wang Huitao, Wang Hua, Long Enshen, et al. Parameter optimization of the low-temperature exhaust gas waste heat powered organic Rankine cycle[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1183—1189.
- [4] Hung T C, Wang S K, Kuo C H, et al. A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources[J]. Energy, 2010, 35(3): 1403—1411.
- [5] Manolakos D, Papadakis G, Mohamed E Sh, et al. Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination[J]. Desalination, 2005, 183(1-3): 73—80.
- [6] Wang Jiangfeng, Dai Yiping, Gao Lin, et al. A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2780—2788.
- [7] 顾伟,孙绍芹,翁一武,等. 采用涡旋膨胀机的低品位热能有机物朗肯循环发电系统实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 20—25.
- [7] Gu Wei, Sun Shaoqin, Weng Yiwu, et al. Experimental study on low grade heat driven organic Rankine cycle by scroll expander[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 20—25.
- [8] 贺红明. 利用 LNG 物理(炯)的朗肯循环研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [8] He Hongming. The study of Rankine cycle utilizing LNG physical exergy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] Szargut J, Szczygiel I. Utilization of the cryogenic exergy of liquid natural gas (LNG) for the production of electricity[J]. Energy, 2009, 34(7): 827—837.
- [10] 徐建. 中低温余热发电有机朗肯循环系统性能分析及优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [10] Xu Jian. Performance analysis and optimization research of mid-low-temperature waste heat power generation using organic Rankine cycle[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [11] Johansson A, Lundqvist P. A method to estimate the circulated composition in refrigeration and heat pump systems using zeotropic refrigerant mixtures[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(8): 798—808.
- [12] 王德华. 基于 AHP-熵值法的有机朗肯循环综合评价分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [12] Wang Dehua. Comprehensive evaluation and analysis of organic Rankine cycle based on AHP-entropy value method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] Dewulf J, Van Langenhove H, Dirckx J. Exergy analysis in the assessment of the sustainability of waste gas treatment systems[J]. The Science of Total Environment, 2001, 273(1-3): 41—52.
- [14] 韩中合,杜燕,王智. 有机朗肯循环低温余热回收系统的工质选择[J]. 化工进展, 2014, 33(9):

- 2279—2285.
- [14] Han Zhonghe, Du Yan, Wang Zhi. Medium selection of organic Rankine cycle (ORC) in low temperature waste heat [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(9): 2279—2285.

PERFORMANCE ANALYSIS AND COMPREHENSIVE EVALUATION OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEM DRIVEN BY SOLAR ENERGY

Gu Yujiong, Geng Zhi, Xie Dian

(National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aimed at the medium-low temperature solar energy heat source, low boiling point organic working fluid was used as the power cycle for power generation. On the premise of meeting the requirements of environmental protection, safety and thermal property, 15 kinds of organic fluids were used as cycle working medium and the mathematical model of subcritical thermal system was established based on the first and second laws of thermodynamics. The pinch temperature difference analysis method was used to analyze and compare the cycle characteristics from the multi-angles including thermal efficiency, exergy efficiency, expansion ratio, environmental exergy cost and so on. Considering various factors, the multi-index comprehensive evaluation model of energy efficiency was constructed by using analytic hierarchy process method. The simulation calculation results showed that toluene as the cycle working medium has a better performance.

Keywords: solar energy; Rankine cycle; working fluid; thermal analysis; exergy; energy efficiency; optimum