

梯形循环及模拟有机朗肯循环的理论研究

李新国, 翟 哲

(天津大学机械工程学院, 天津 300350)

摘 要: 基于有机朗肯循环, 提出梯形循环及其理论模型, 分析梯形循环与有机朗肯循环之间的偏差。分析表明: 当蒸发温度低于临界温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 梯形循环与有机朗肯循环的偏差小于 5% ; 优化工况下的蒸发温度、最大净输出功及其热效率的相对偏差分别小于 2.62% 、 2.42% 、 6.21% 。基于前期研究提出的优化工况下蒸发温度、最大净输出功和热效率的经验公式进行偏差与应用范围的分析, 得到经验公式与有机朗肯循环(及梯形循环)之间的相对偏差分别为优化蒸发温度小于 3.26% (1.42%)、最大净输出功小于 3.14% (2.46%) 和热效率小于 5.53% (3.06%)。梯形循环与经验公式可不受具体工质与循环构型的限制, 开展有机朗肯循环的拓展性研究, 研究有机朗肯循环(或梯形循环)的一般性热力学规律。

关键词: 有机朗肯循环; 梯形循环; 经验公式; 偏差分析

中图分类号: TK123

文献标识码: A

0 引 言

有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)已成为中低温热能高效回收利用领域的研究热点。有机朗肯循环的研究一般是采取实验或者数值模拟。魏莉莉等^[1]搭建试验台, 对 R142b、R152a 和 R134a 这 3 种工质进行对比实验, 分析压力、液体密度、潜热、气体比容、膨胀过程焓差等因素对低温热能发电的影响。郭东奇等^[2]针对 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水型余热, 对应用于 ORC 的径流式汽轮机的喷嘴进行一维稳定流动分析, 以单位质量热源水的发电量(比净功)最大为目标函数, 开展 ORC 变工况实验研究。王 智等^[3]以 120 kW 向心透平设计为目标, 通过热力计算多种工质, 确定各透平的几何尺寸、通流部件进出口气流参数、轮周效率和轴效率, 并综合比较各工质透平的热力性能。张红光等^[4]基于 Fluent 对余热回收 ORC 中的蒸发器进行数值模拟, 分析蒸发器壳侧柴油机尾气的流动与传热特性, 并利用场协同原理讨论蒸发器的换热性能。倪 渊等^[5]用异戊烷、6 种丁烷/己烷和 5 种异丁烷/己烷不同质量配比的二元非共沸混合物共 12 种物质作为亚临界 ORC 工质, 利用窄点分析方法

分析循环性能。文献[6]提出 ORC 的工质热源转折温度, 指工质净输出功随热源温度存在从有极值功向无极值功转折的热源温度。当热源温度低于工质热源转折温度时, 工质循环存在优化工况, 即存在优化蒸发温度与净功极值。当热源温度高于工质热源转折温度时, 工质循环不存在优化工况, 即净功随蒸发温度升高而增大, 不存在极值功。并指出不同热源温度有合适的工质, 或工质有其相适应的热源温度, 使得循环的输出功尽可能高。

有研究推导了数学关系式来计算循环性能。最早严家禄^[7]针对热流体流量不变与供热量不变 2 种情况, 分别推导出工质最佳蒸发温度和最佳冷却水温升(或最佳冷凝温度)的计算式和相应的修正系数, 计算表明这些计算式不但可靠, 而且很精确。文献[8, 9]建立循环净功与优化蒸发温度的解析表达式, 表明优化蒸发温度的理论值与 ORC 数值计算之间的偏差仅为 $-0.86\%\sim 2.30\%$, 平均偏差小于 1% 。文献[10, 11]也建立循环净功的理论模型, 推导理论计算公式, 其计算结果与 ORC 的数值计算结果也非常一致。王辉涛等^[12]建立 ORC 的数学模型, 以效率或净输出功为目标函数, 用内罚函数和黄金分割搜索优化算法对示例进行参数优化。

收稿日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51276122)

通信作者: 李新国(1965—), 男, 博士、教授, 主要从事工程热力学方面的研究。xgli@tju.edu.cn

文献[13,14]分析了窄点温差对 ORC 经济性和净输出功的影响。文献[15]基于跨临界 ORC,讨论工质临界温度对循环性能的影响。

综上所述,有机朗肯循环受到广泛重视并进行了深入研究。但有机朗肯循环受限于具体工质,一般是针对具体工质的数值计算。但由于实际工质的物性不是变量,其研究不具备理论意义的普遍性。基于此,笔者前期研究提出梯形循环^[16],本文将在更宽的范围内,验证梯形循环及其理论模型与有机朗肯循环的偏差及其理论价值。

1 梯形循环及其理论模型

基于基本内可逆有机朗肯循环(ORC),即循环的不可逆损失仅存在于蒸发器与冷凝器中的工质与外界热源、冷源之间的传热,构建梯形循环(trapezoidal cycle, TPC)^[16],如图 1 所示。其中 2 个主要简化为:1) 用线段 3—4 替代 ORC 中过程 3—3'—4 构成梯形的斜边;2) 用线段 2—2'替代 ORC 中过程 2'—2"。这样构建出理想的 TPC 循环过程 1—2—3—4。

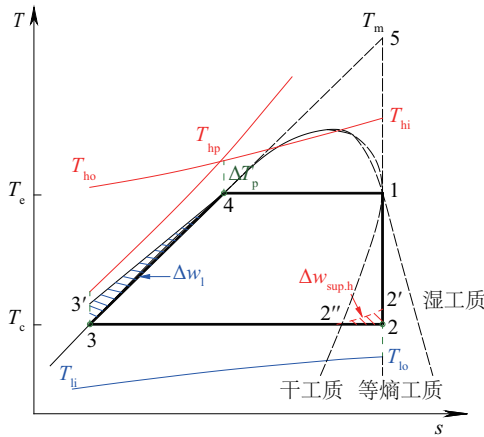


图 1 有机朗肯循环与梯形循环的 T - s 图

Fig. 1 Organic Rankine cycle and trapezoidal cycle in T - s diagram

由于该 2 处简化,使得 TPC 相比于 ORC 存在 2 个偏差:一个是因采用线段 3—4 替代过程 3—3'—4 导致过冷区的比功损失 Δw_l (3—3'—4 所围面积);另一个是因采用线段 2—2'替代过程 2'—2"导致过热区的比功增加 $\Delta w_{sup,h}$ (2"—2'—2 所围面积)。

对于湿工质和等熵工质或膨胀过程为“湿膨胀”,仅存在偏差 Δw_l ,所以 TPC 的比功与 ORC 相

比为负偏差。对于干工质或“干膨胀”过程,既存在偏差 Δw_l 又存在偏差 $\Delta w_{sup,h}$ 。当 $\Delta w_l > \Delta w_{sup,h}$ 时,TPC 的比功与 ORC 相比为负偏差;当 $\Delta w_l < \Delta w_{sup,h}$ 时,TPC 的比功与 ORC 相比为正偏差。随蒸发温度的增加, Δw_l 逐渐增大, $\Delta w_{sup,h}$ 可能会小于 Δw_l ,所以 TPC 的比功与 ORC 相比为负偏差。

由此,基于梯形构型与 T - s 图上的热力学关系,按蒸发器中的传热窄点在不同位置,可推导出梯形循环的净输出功 W_{TPC} 与热效率 η_{TPC} 的理论公式^[16]为:

1) 窄点位于工质的泡点(即 4 点)时的净输出功 W_{TPC} 与热效率 η_{TPC} :

$$W_{TPC} = w \cdot m_w$$

$$= c_{ph} m_h (T_{hi} - T_e - \Delta T_p) \cdot (T_e - T_c) \cdot \left(\frac{1}{T_e} + \frac{J_a}{T_e + T_c} \right) \quad (1)$$

$$\eta_{TPC} = \left(1 - \frac{T_c}{T_e} \right) \left(1 + J_a \frac{T_e}{T_e + T_c} \right) / (1 + J_a) \quad (2)$$

式中, c_{ph} ——热源定压比热容; m_h ——热源流量; T_{hi} ——热源进口温度; T_e ——蒸发温度; ΔT_p ——蒸发器窄点温差; T_c ——冷凝温度; J_a ——蒸发温度 T_e , 冷凝温度 T_c 时的雅克比数,由图 1 中的梯形构型关系可推导 J_a 的计算式为:

$$J_a = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_4} = \frac{T_e^2 - T_c^2}{2T_e(T_m - T_e)} \quad (3)$$

式中, T_m ——顶点温度,为梯形斜边 3—4 与等熵膨胀线 1—2 交于 5 点的温度, T_m 随工质物性及干、湿或等熵性质而变化,随蒸发温度而变化。

2) 窄点位于蒸发器进口(即 3 点),热效率 η_{TPC} 计算式仍为式(2),净输出功 W_{TPC} 计算式为:

$$W_{TPC} = c_{ph} \cdot m_h \cdot (T_{hi} - T_c - \Delta T_p) \cdot \eta_{TPC} \quad (4)$$

3) 窄点位于 3 点与 4 点之间任意点,设窄点处工质温度为 T_p ,热效率 η_{TPC} 的计算式仍为式(2),净输出功 W_{TPC} 的计算式为:

$$W_{TPC} = \frac{c_{ph} \cdot m_h \cdot (T_{hi} - T_p - \Delta T_p) \cdot (T_e - T_c) \cdot \left(\frac{1}{T_e} + \frac{J_a}{T_e + T_c} \right)}{\frac{T_e^2 - T_p^2}{2\theta \cdot r} + 1} \quad (5)$$

式中, θ ——梯形斜边的斜率; r ——蒸发潜热。

可推证式(5)为通式。

前期研究^[6]指出工质存在热源转折温度 $T_{h,shift}$, 指工质净输出功随热源温度存在从有极值向无极值转折的热源温度。当热源温度低于工质的热源转折温度时, 工质循环存在优化工况, 即存在优化蒸发温度与净功极值。当热源温度高于工质热源转折温度时, 工质循环不存在优化工况, 即净功随蒸发温度单调增加, 不存在极值。

2 梯形循环与有机朗肯循环的偏差

2.1 梯形循环与有机朗肯循环之间的偏差

对梯形循环(TPC)与有机朗肯循环(ORC)之间的偏差进行分析。定义为 TPC 与 ORC 之间的相对偏差, 计算式为:

$$\Delta_{rel} = \frac{V_{TPC} - V_{ORC}}{V_{ORC}} \quad (6)$$

式中, V_{ORC} ——ORC 的数值计算值; V_{TPC} ——TPC 的理论计算值。

计算依据与条件为: 水作为热源, 进口温度 T_{hi} 设为 120 °C, 流量 m_h 为 1 kg/s, 冷凝温度 T_c 为 35 °C, 蒸发器的传热窄点温差 ΔT_p 取 5 °C。

图 2 表示了 TPC 与 ORC 的净输出功及其偏差 Δ_{rel} 随蒸发温度的变化。工质 R227ea、R290、R134a、R152a、R600a、R245fa 的热源转折温度分别为 114.5、118.8、119.8、135.4、157.0、179.4 °C, 见表 1。当热源进口温度 T_{hi} 为 120 °C 时, R227ea、R290、R134a 的热源转折温度低于热源进口温度, 所以工质循环无优化工况, 即净输出功随蒸发温度单调增加; 而 R152a、R600a、R245fa 的热源转折温度高于热源进口温度, 所以工质循环具有优化工况, 即净输出功随蒸发温度有极大值。如图 2 所示。

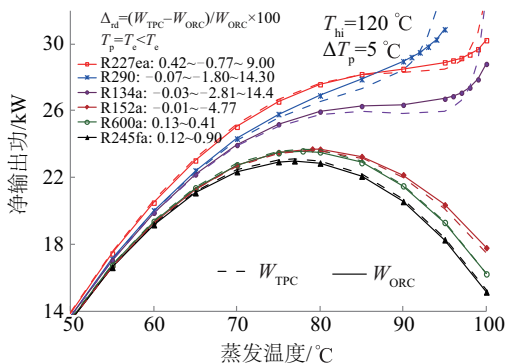


图2 TPC 与 ORC 净输出功及其偏差 Δ_{rel} 随蒸发温度的变化

Fig. 2 Net power output and relative deviation Δ_{rel} with evaporation temperature

当窄点位于工质泡点时, R227ea、R290、R134a、R152a、R600a、R245fa 的 Δ_{rel} 范围分别为 0.42%~ -0.77%; -0.07%~-1.8%; -0.03%~-2.81%; -0.01%~-4.77%; 0.13%~0.41%; 0.12%~0.90%。当窄点低于工质泡点时, R227ea、R290、R134a 的 Δ_{rel} 范围分别为 -0.77%~9%; -1.8%~14.3%; -2.81%~14.4%。当蒸发温度低于 $T_{cr}-5$ °C 时, $\Delta_{rel} < 5\%$; 当蒸发温度为 $T_{cr}-5 \sim T_{cr}$ °C 时, Δ_{rel} 升高。

2.2 梯形循环与有机朗肯循环优化工况之间的偏差

改变热源进口温度 T_{hi} 和窄点温差 ΔT_p , 其余参数不变, 计算 ORC 与 TPC 优化工况下的蒸发温度 $T_{e,opt}$, 最大净输出功 W_{max} 及热效率 η_m , 并对二者进行偏差分析。由于优化工况只存在于热源进口温度 T_{hi} 低于工质的热源转折温度 ($T_{h,shift}$), 故工质的热源进口温度 T_{hi} 选择须小于 $T_{h,shift}$ 。

计算依据与条件为: 热源水进口温度为 80~ ($T_{h,shift}-1$) °C, 热源水流量 m_h 为 1 kg/s, 冷凝温度 T_c 为 35 °C, 蒸发器传热窄点温差 ΔT_p 为 3~12 °C。

偏差分析主要以拟合优度 R^2 和最大相对偏差 Δ_{max} 为依据, 其中 R^2 是回归分析中的判定系数:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{\sum(Y^* - Y)^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

式中, RSS ——残差平方和; TSS ——离差平方和; Y^* ——TPC 的计算值; Y ——ORC 的计算值; \bar{Y} ——ORC 计算值的期望; 拟合优度越接近 1 表示偏差越小。

最大相对偏差 Δ_{max} , 计算式为:

$$\Delta_{max} = \max\left(\frac{Y^* - Y}{Y}\right) \quad (8)$$

式中, Δ_{max} ——TPC 与 ORC 二者之间相对偏差的最大值, Δ_{max} 越接近零表示偏差越小。

偏差结果如表 1, 优化工况下, TPC 与 ORC 的优化蒸发温度 $T_{e,opt}$ 拟合优度平均值为 0.9973, 相对偏差平均值为 1.87%, R600a 的最大相对偏差为 2.62%。最大净输出功 W_{max} 拟合优度的平均值为 0.9991, 相对偏差平均值为 1.42%, RC318 的最大相对偏差为 2.42%。热效率 η_m 拟合优度的平均值为 0.9839, 相对偏差平均值为 3.64%, 最大相对偏差是 R1270 为 6.21%。表明 TPC 与 ORC 的偏差很小, 梯形循环完全可模拟基本内可逆的有机朗肯循环。

表 1 梯形循环与有机朗肯循环优化工况之间的偏差

Table 1 Goodness of fit R^2 and maximum relative deviation Δ_{\max} of optimal conditions between TPC and ORC

工质	$T_{h,shift}/$ °C	$T_{c,opt}$		W_{\max}		η_m	
		R^2	$\Delta_{\max}/\%$	R^2	$\Delta_{\max}/\%$	R^2	$\Delta_{\max}/\%$
R32	96.6	0.9811	1.88	0.9953	2.38	0.8916	6.11
R1270	108.3	0.9942	2.37	0.9984	2.37	0.9638	6.21
R1234yf	111.6	0.9975	1.46	0.9993	1.69	0.9825	4.18
R290	114.5	0.9963	2.26	0.9990	2.17	0.9768	5.65
R134a	119.8	0.9980	1.88	0.9995	1.66	0.9888	4.42
R227ea	118.8	0.9989	1.71	0.9999	0.57	0.9977	3.04
R1234ze	129.0	0.9989	1.67	0.9997	1.41	0.9935	3.79
R152a	135.4	0.9986	2.32	0.9997	1.57	0.9933	4.54
RC318	133.2	0.9996	0.91	0.9975	2.42	0.9903	2.21
R236fa	143.2	0.9997	1.57	0.9999	0.55	0.9996	2.01
R600a	157.0	0.9994	2.62	1.0000	0.87	0.9984	3.69
R236ea	165.6	0.9998	1.44	0.9995	1.27	0.9988	1.06
R600	176.9	0.9997	2.42	1.0000	0.37	0.9996	2.67
R245fa	179.4	0.9999	1.61	0.9999	0.59	0.9998	1.43

3 优化工况下循环性能的经验公式

为了可直接计算优化工况下的优化蒸发温度、最大净输出功及热效率,本文针对有机朗肯循环和梯形循环给出了相关的经验公式。

3.1 优化工况下循环性能的经验公式

3.1.1 优化蒸发温度

严家禄^[7]曾提出有机朗肯循环优化蒸发温度的经验公式:

$$T_{c,opt} \approx \sqrt{(T_{hi} - \Delta T_p) T_c} \cdot [0.999 + 0.00041(T_{hi} - T_c) J_a^*] \quad (9)$$

参考该经验公式(9),进行修正后得到:

$$T_{c,opt} \approx \sqrt{T_{e,max} T_c} \cdot [1 + k(T_{e,max} - T_c) J_a^{*2}] \quad (10)$$

式中, $T_{e,max}$ ——最高蒸发温度, $T_{e,max} = T_{hi} - \Delta T_p$; J_a^* ——蒸发温度 T^* 下的雅克比数, 其中 $T^* = \sqrt{(T_{hi} - \Delta T_p) \cdot T_c} = \sqrt{T_{e,max} T_c}$; k ——工质修正系数。

3.1.2 最大净输出功

优化工况下的最大净输出功可用以下经验公

式计算:

$$W_{\max} \approx c_{ph} m_h \left(\sqrt{T_{e,max}} - \sqrt{T_c} \right)^2 \cdot \left[1 - \frac{J_a^*}{2(1 - \eta_{c,max})} \right] \quad (11)$$

式中, $\eta_{c,max}$ ——最高蒸发温度 $T_{e,max}$ 和冷凝温度 T_c 下的卡诺循环热效率, $\eta_{c,max} = 1 - T_c/T_{e,max}$ 。

3.1.3 热效率

优化工况下的热效率 η_m , 即对应于最大净输出功 W_{\max} 时的热效率:

$$\eta_m \approx c \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{T_c}{T_{e,max}}} \right) \quad (12)$$

式中, c ——工质修正系数。

3.2 优化工况经验公式与有机朗肯循环的偏差

对优化工况下的经验公式与有机朗肯循环(ORC)和梯形循环(TPC)进行比较,和偏差分析。

计算依据与条件为:热源水进口温度为 $80 \sim (T_{h,shift} - 1)$ °C,热源水流量 m_h 为 1 kg/s,冷凝温度 T_c 为 35 °C,蒸发器传热窄点温差 ΔT_p 为 3~12 °C。

基于 ORC 与 TPC,对式(10)~式(12),分别给出 14 种工质的偏差和修正系数,见表 2~表 4。

表2 优化蒸发温度经验公式(10)的修正系数 k 与偏差Table 2 Correction factor k , goodness of fit R^2 and maximum relative deviation Δ_{\max} of Eq. (10) compared with ORC or TPC

工质	ORC			TPC		
	k	R^2	$\Delta_{\max}/\%$	k	R^2	$\Delta_{\max}/\%$
R32	0.0031	0.999	0.69	0.0024	0.999	0.34
R1270	0.0021	0.999	1.33	0.0018	0.998	0.57
R1234yf	0.0016	0.998	0.68	0.0014	0.998	0.71
R290	0.0019	0.999	1.31	0.0016	0.998	0.66
R134a	0.0017	0.999	1.15	0.0015	0.998	0.72
R227ea	0.0012	0.998	1.11	0.0011	0.997	0.92
R1234ze	0.0015	0.998	1.03	0.0013	0.998	0.87
R152a	0.0019	0.999	1.83	0.0017	0.999	0.77
RC318	0.0010	0.998	1.15	0.0010	0.997	1.19
R236fa	0.0012	0.998	1.54	0.0011	0.998	1.12
R600a	0.0013	0.999	2.84	0.0012	0.998	1.18
R236ea	0.0010	0.998	2.51	0.0010	0.998	1.40
R600	0.0012	0.999	3.26	0.0011	0.998	1.35
R245fa	0.0011	0.999	2.68	0.0011	0.998	1.42

表3 最大净输出功经验公式(11)的偏差

Table 3 Goodness of fit R^2 and maximum relative deviation Δ_{\max} of Eq. (11) compared with ORC or TPC

工质	ORC		TPC	
	R^2	$\Delta_{\max}/\%$	R^2	$\Delta_{\max}/\%$
R32	0.987	2.66	0.993	0.76
R1270	0.989	2.95	0.991	1.04
R1234yf	0.992	2.51	0.993	0.92
R290	0.991	2.80	0.991	1.12
R134a	0.994	2.23	0.991	1.11
R227ea	0.992	2.01	0.993	1.05
R1234ze	0.994	2.03	0.990	1.27
R152a	0.995	1.62	0.987	1.49
RC318	0.973	3.14	0.991	1.21
R236fa	0.986	1.85	0.988	1.51
R600a	0.987	1.74	0.984	1.95
R236ea	0.976	2.98	0.984	2.02
R600	0.979	2.58	0.980	2.46
R245fa	0.977	2.82	0.980	2.43

表4 优化工况下热效率经验公式(12)的修正系数 c 与偏差Table 4 Correction factor c , goodness of fit R^2 and maximum relative deviation Δ_{\max} of Eq. (12) compared with ORC or TPC

工质	ORC			TPC		
	c	R^2	$\Delta_{\max}/\%$	c	R^2	$\Delta_{\max}/\%$
R32	1.0048	0.988	4.11	0.9725	0.997	1.15
R1270	0.9910	0.987	5.10	0.9641	0.997	1.56
R1234yf	0.9766	0.991	3.59	0.9578	0.997	1.32
R290	0.9859	0.988	4.92	0.9623	0.997	1.64
R134a	0.9806	0.989	4.42	0.9634	0.996	1.76
R227ea	0.9575	0.991	4.16	0.9522	0.996	1.70
R1234ze	0.9748	0.990	4.14	0.9604	0.996	1.83
R152a	0.9843	0.988	5.05	0.9687	0.995	2.12
RC318	0.9300	0.993	3.08	0.9484	0.996	1.87
R236fa	0.9572	0.991	4.16	0.9571	0.995	2.20
R600a	0.9683	0.988	5.53	0.9611	0.994	2.65
R236ea	0.9502	0.991	4.46	0.9582	0.993	2.96
R600	0.9659	0.988	5.45	0.9638	0.993	3.06
R245fa	0.9616	0.990	4.74	0.9637	0.992	3.15

表 2 给出了优化蒸发温度经验公式(10)的修正系数与偏差。ORC 的修正系数 k 平均值为 0.0015, 拟合优度平均值为 0.9985, 最大相对偏差平均值 1.65%。TPC 的修正系数平均值 0.0014, 拟合优度平均值 0.9981, 最大相对偏差平均值 0.94%。最大偏差 Δ_{\max} 出现在热源进口温度靠近工质的热源转折温度处, 但其最大偏差也小于 3.5%。

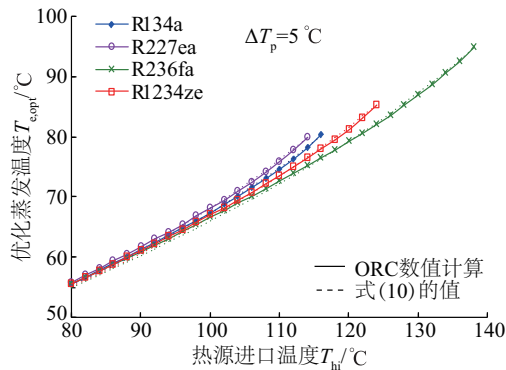
表 3 给出了最大净输出功经验公式(11)的偏差。ORC 的拟合优度平均值为 0.9865, 相对偏差平均值为 2.42%; TPC 的拟合优度平均值 0.9882, 相对偏差平均值 1.45%。

表 4 给出了优化工况下热效率经验公式(12)的修正系数与偏差。ORC 的修正系数 c 平均值为 0.9706, 拟合优度平均值为 0.9964, 相对偏差平均值为 4.49%; TPC 的修正系数平均值 0.9601, 拟合优度平均值 0.9994, 相对偏差平均值 2.07%。

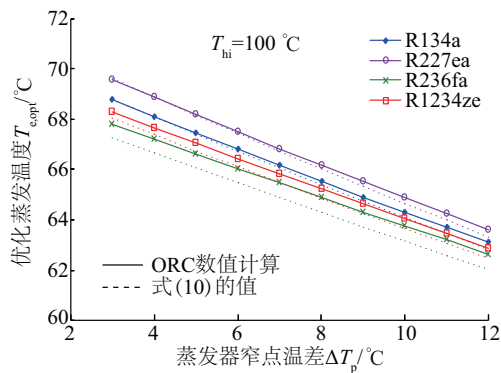
图 3~图 5 给出了 3 种代表性工质 R1234a、R227ea、R236fa 随热源进口温度 T_{hi} 和蒸发器窄点温

差 ΔT_p 的变化。表明: 优化工况下的经验公式: 优化蒸发温度 $T_{e,opt}$ (式(10)), 最大净输出功 W_{\max} (式(11)) 和热效率 η_m (式(12)) 与 ORC 的数值计算非常接近。

综上所述, 经验公式完全可模拟 ORC 的优化工况计算。



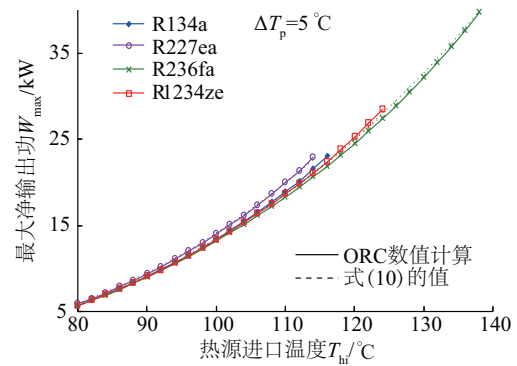
a. 热源进口温度 T_{hi} 变化



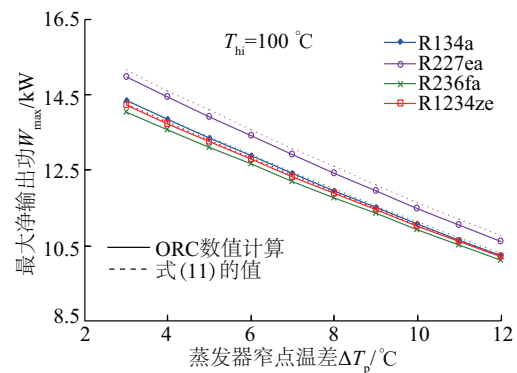
b. 蒸发器窄点温差 ΔT_p 变化

图 3 经验公式(10)与 ORC 的对比——优化蒸发温度 $T_{e,opt}$ 随热源进口温度 T_{hi} 或蒸发器窄点温差 ΔT_p 的变化

Fig. 3 Validation of optimal evaporation temperature with heat source temperature or pinch point temperature difference between Eq. (10) and ORC



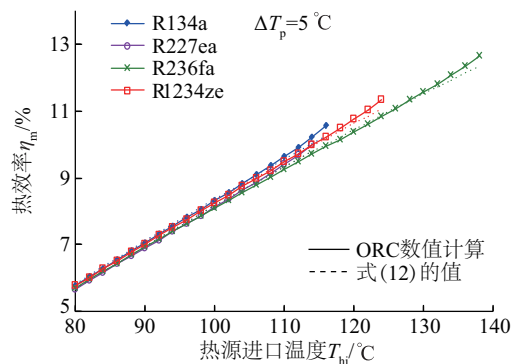
a. 热源进口温度 T_{hi} 变化



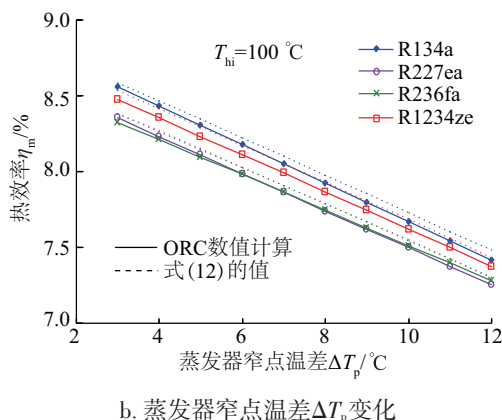
b. 蒸发器窄点温差 ΔT_p 变化

图 4 经验公式(11)与 ORC 的对比——最大净输出功 W_{\max} 随热源进口温度 T_{hi} 或蒸发器窄点温差 ΔT_p 的变化

Fig. 4 Validation of maximum net power output with heat source temperature or pinch point temperature difference between Eq. (11) and ORC



a. 热源进口温度 T_{hi} 变化



b. 蒸发器窄点温差 ΔT_p 变化

图5 经验公式(12)与ORC的对比——热效率 η_m 随热源进口温度 T_h 或蒸发器窄点温差 ΔT_p 的变化

Fig. 5 Validation of thermal efficiency with heat source temperature or pinch point temperature difference between Eq. (12) and ORC

4 结 论

1) 验证梯形循环与有机朗肯循环的偏差,当蒸发温度低于临界温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,偏差小于 5% ;但当蒸发温度接近临界温度时,二者的偏差较大。

2) 验证梯形循环与有机朗肯循环优化工况之间的偏差,得到:优化蒸发温度、最大净输出功及其热效率的相对偏差分别小于 2.62% 、 2.42% 、 6.21% 。

3) 提出模拟有机朗肯循环(或梯形循环)优化工况下蒸发温度、最大净输出功及热效率的经验公式。经验公式与有机朗肯循环(及梯形循环)之间的相对偏差分别为:优化蒸发温度小于 3.26% (1.42%)、最大净输出功小于 3.14% (2.46%)、热效率小于 5.53% (3.06%)。

[参考文献]

[1] 魏莉莉, 张于峰, 穆永超, 等. 工质性质对有机朗肯循环低温发电系统影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2514—2518.

[1] Wei Lili, Zhang Yufeng, Mu Yongchao, et al. The experimental study on influence of working fluid property on low temperature power generation system based on organic Rankine cycle (ORC)[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2514—2518

[2] 郭东奇, 王怀信, 潘利生. 余热发电有机朗肯循环系统性能实验研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(6): 1325—1330.

[2] Guo Dongqi, Wang Huaixin, Pan Lisheng. The experimental study on the performance of Waste heat power generation based on organic Rankine cycle (ORC)[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2015, 36(6): 1325—1330.

[3] 王 智, 吴伟铭, 韩中合. 基于向心透平热力设计优化的有机朗肯循环工质选择[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2225—2230.

[3] Wang Zhi, Wu Weiming, Han Zhonghe. The selection of organic Rankine cycle working fluids based on the optimization of centripetal turbine thermal design[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2225—2230.

[4] 张红光, 贝 晨, 杨富斌, 等. ORC系统蒸发器性能分析及其对柴油机性能影响[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 462—468.

[4] Zhang Hongguang, Bei Chen, Yang Fubin, et al. The analyze of performance of evaporator in ORC and its influence on the performance of diesel engine[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(2): 462—468.

[5] 倪 渊, 赵良举, 刘 朝, 等. 非共沸混合工质ORC对低焓地热能的深度利用[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1670—1676.

[5] Ni Yuan, Zhao Liangju, Liu Chao, et al. The depth utilization of low enthalpy geothermal energy in ORC based on non azeotropic mixed working fluids[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1670—1676.

[6] Li Xinguo, Zhao Wenjing, Lin Diedie, et al. Working fluid selection based on critical temperature and water temperature in organic Rankine cycle[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(1): 138—146.

[7] 严家禄. 低温热能发电方案中选择工质和确定参数的热力学原则和计算[J]. 工程热物理学报, 1982, 3(1): 1—7.

[7] Yan Jialu. The thermodynamic principles and calculation of working fluids selection and parameters determination in low temperature heat power generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1982, 3(1): 1—7.

[8] He Chao, Liu Chao, Gao Hong, et al. The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle[J]. Energy, 2012, 38(1): 136—143.

[9] He Chao, Liu Chao, Zhou Mengtong, et al. A new selection principle of working fluids for subcritical organic Rankine cycle coupling with different heat

- sources[J]. *Energy*, 2014, 68(15): 283—291.
- [10] Wang Dongxiang, Ling Xiang, Peng Hao, et al. Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation[J]. *Energy*, 2013, 50(1): 343—352.
- [11] Wang Dongxiang, Ling Xiang, Peng Hao. Cost-effectiveness performance analysis of organic Rankine cycle for low grade heat utilization coupling with operation condition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58(1-2): 571—584.
- [12] 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.
- [12] Wang Huitao, Wang Hua, Long Enshen, et al. The optimization of organic Rankine cycle driven by low temperature waste heat[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2013, 34(7): 1183—1189.
- [13] Li Yourong, Wang Jianning, Du Meitang, et al. Effect of pinch point temperature difference on cost-effective performance of organic Rankine cycle [J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37 (15) : 1952—1962.
- [14] Li Dianxun, Zhang Shusheng, Wang Guihua. Selection of organic Rankine cycle working fluids in the low-temperature waste heat utilization [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 27(3): 458—464.
- [15] Xu Jinliang, Liu Chao. Effect of the critical temperature of organic fluids on supercritical pressure organic Rankine cycles[J]. *Energy*, 2013, 63(1): 109—122.
- [16] Li Xinguo. A trapezoidal cycle with theoretical model based on organic Rankine cycle [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40: 1624—1637.

TRAPEZOIDAL CYCLE AND THEORETICAL STUDY OF SIMULATING ORGANIC RANKINE CYCLE

Li Xinguo, Zhai Zhe

(*School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: Trapezoidal cycle (TPC) and its theoretical model are proposed based on organic Rankine cycle (ORC). The deviation between TPC and ORC is analyzed. The analyses show that when evaporation temperature is 5 °C lower than the critical temperature of the working fluid, the deviation between TPC and ORC is lower than 5%. The relative deviations of evaporation temperature, maximum net output work and thermal efficiency under the optimized working condition are lower than 2.62% , 2.42% and 6.21% , respectively. Based on the empirical equations of evaporation temperature, maximum net output work and thermal efficiency under the optimized working conditions presented by previous work, the analyses of deviation and application range were carried out to get the relative deviations of the optimal evaporation temperature, maximum net output work and thermal efficiency between the empirical equations and ORC (and TPC) are lower than 3.26% (1.42%) , 3.14% (2.46%) and 5.53% (3.06%) , respectively. The trapezoidal cycle and empirical equations can break through the restrictions of actual working fluids and the configuration of the cycle, perform extended research of the ORC and investigate the general thermodynamics principles of the ORC (or TPC).

Keywords: organic Rankine cycle; trapezoidal cycle(TPC); empirical equations; deviation analysis