

DOI: 10.7652/xjtuxb201309002

CE 图：一种余热利用循环及工质选择的 定量评价方法

席 奂, 李明佳, 何雅玲, 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要：鉴于当前余热利用循环的系统优劣性评价和工质筛选缺乏定量的方法和评价准则,以帕累托最优解为基本思想,以多目标函数遗传算法为实现手段,在综合考虑年度经济收益及能量利用效率的基础上,提出了余热利用评价焓效率-年度现金流量双效图(以下简称 CE 图),给出了 CE 图的制作方法,分析说明了 CE 图中各特殊点的意义。以两种常见的余热利用循环系统——基本有机朗肯循环和内回热有机朗肯循环为例,采用 30 种常见有机工质,在 100~300 °C 之间的不同余热温度下解释说明了所提出的 CE 图如何用来评价余热利用循环系统的优劣性,以及如何用来进行工质的筛选。对不同系统、不同工质 CE 图的对比方法进行了阐述,并且对 CE 图在余热利用领域的进一步开发利用进行了展望。

关键词：余热利用评价图;评价方法和评价准则;有机朗肯循环;有机工质

中图分类号：TK11 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-987X(2013)09-0008-08

CE Diagram: A Quantitative Evaluation Criterion for Waste Heat Recovery Power System and Working Fluids with Applications

XI Huan, LI Mingjia, HE Yaling, TAO Wenquan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On the basis of the concept of Pareto optimum solution to the multi-object function and the comprehensive considerations of both annual cash-flow and energy utilization efficiency, a double-efficiency diagram of annual cash flow-exergy efficiency (CE) was proposed by the implementation of the multi-objectives genetic algorithm. For the CE diagram, the graphing method was described, and the meaning of endpoints was analyzed. 30 chlorine-absent working fluids were employed and tested under different working conditions. Typical ORC systems (i. e. basic organic Rankine cycle, BORC, and organic Rankine cycle with internal heat exchanger, IHORC) were both studied as examples. The proposed method can be used for working fluids selection and thermodynamic system comparison, and case studies were given by segmenting the CE diagrams into different parts. In addition, an outlook for the further applications of CE was presented. The proposed quantitative method would be applicable to any closed loop waste heat recovery thermodynamic system and working fluids.

Keywords: performance evaluation diagram for waste heat recovery; evaluation method and criterion; organic Rankine cycle; organic working fluid

收稿日期: 2013-04-09。 作者简介: 席奂(1988—),男,博士生;何雅玲(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB228304);教育部高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助项目(20120201130006)。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.0840.009.html>

工业余热的高效综合利用是实现我国节能减排战略目标的重要途径,也是当前能源领域的热点问题。作为中低温余热利用的常规手段,余热利用循环受到越来越多的关注。目前对于余热利用循环的研究工作,大部分集中在循环形式改进^[1]、循环参数优化^[2]、循环工质的筛选^[3] 3 个方面。

首先,对于一个既定的循环形式,从不同的角度出发,对其在不同运行工况、不同循环工质下的优劣性进行评价有不同的评价指标。例如,从热功转换的角度出发,可选取循环的热效率^[4-5]为评价指标;从有效能的利用效率出发,则评价指标为焓效率^[6];侧重于考虑工业余热回收系统的经济效益时,有学者还采用经济收益^[7]、能效比^[3]等多种评价指标。对应到具体的工业实际中,上述各种评价指标往往不能兼顾,一般都存在博弈对立的现象。例如,对于一个既定的循环,即使其在某种工况下运行时具有很高的热效率或者焓效率,但此时其年度收益有可能很低甚至为负值(亏损)。因此,采用单一指标对循环的优劣性进行评价,不能满足实际的工业需求。

其次,对于循环参数的优化,也同样存在定量化评价方法缺乏的问题。在目前的研究中,无论采用何种优化手段,其待优化的目标函数大都是单一的。当一种既定的循环在采用某一目标函数优化所得的循环工况下运行时,另外一种评价指标参数往往并非处于最佳状态。例如,以焓效率为优化目标进行优化所获得的循环工况参数,只能保证系统在此参数下运行时的焓效率最大,但是其余指标,例如经济效益,可能并非处于最优状态。因此,采用单一目标函数进行系统的优化,在很多情况下都是与工业实际相悖的,无法满足工业需求。

再次,工质的筛选和评价除了要考虑其环保特性、安全性及其化学稳定性等本身固有的性能之外,工质所对应的循环性能往往是工质筛选的核心指标。对于不同类型的循环、不同的能量利用形式,所对应的最佳工质必然是不同的,因此工质的筛选也同样存在定量化评价方法缺乏的问题。

综上所述,当前余热利用循环的系统优劣性评价和工质的筛选缺乏定量的方法和评价准则。在此需求基础上,本文采用帕累托的思想,以多目标函数遗传算法为手段,在综合考虑年度经济收益及能量利用效率的基础上,首次提出了焓效率-年度现金流量双效图(以下简称 CE 图),给出了 CE 图的制作方法,分析说明了 CE 图中各特殊点的意义。以两种常见的余热利用循环系统——基本有机朗肯循环

(BORC)和内回热有机朗肯循环(IHORC)采用 30 种常见有机工质为例(见表 1),解释说明了在 100~300℃之间的不同余热温度下所提出的 CE 图如何用来评价余热利用循环系统的优劣性,以及如何用来进行工质的筛选。另外,对不同系统、不同工质 CE 图的对比方法进行了阐述,并且对 CE 图在余热利用领域的进一步开发利用进行了展望。适用于不同余热系统、不同余热工况的不同形式的 CE 图,将在后续工作中进一步呈现。

表 1 所选取的 30 种工质的基本热力学性能参数

编号	工质名称	相对分子 质量 /kg·kmol ⁻¹	临界 温度 /℃	临界 压力 /MPa
1	R227ea	170.03	374.9	2.93
2	R1234ze	114.04	382.5	3.64
3	Perfluorobutane	238.03	386.3	2.32
4	RC318	200.03	388.4	2.78
5	R236fa	152.04	398.1	3.20
6	Isobutane	58.122	407.8	3.63
7	R236ea	152.04	412.4	3.50
8	Isobutene	56.106	418.1	4.00
9	Butene	56.106	419.3	4.01
10	Perfluoropentane	288.03	420.6	2.05
11	Butane	58.122	425.1	3.80
12	R245fa	134.05	427.2	3.65
13	Trans-butene	56.106	428.6	4.03
14	Neopentane	72.149	433.7	3.20
15	Cis-butene	56.106	435.8	4.23
16	R245ca	134.05	447.6	3.93
17	R365mfc	148.07	460.0	3.27
18	Isopentane	72.149	460.4	3.38
19	Pentane	72.149	469.7	3.37
20	Isohexane	86.175	497.7	3.04
21	Hexane	86.175	507.8	3.03
22	Acetone	58.079	508.1	4.70
23	Heptane	100.2	540.1	2.74
24	Cyclohexane	84.161	553.6	4.08
25	Benzene	78.108	562.1	4.89
26	Octane	114.23	569.3	2.50
27	Toluene	92.138	591.8	4.13
28	Nonane	128.26	594.6	2.28
29	Decane	142.28	617.7	2.10
30	Dodecane	170.33	658.1	1.82

1 目标函数优化简介

对于多目标函数优化问题,最为常用的方法是通过权系数的形式对多种评判指标进行线性加和^[8],形成一个统一的指标参数,即

$$F = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) \cdots a_i f_i(x) \quad (1)$$

式中: F 为综合考虑多个评价指标后的综合指标参数; $a_1, a_2, \cdots, a_i$ 为加权系数; $f_1(x), f_2(x), \cdots, f_i(x)$ 为独立的评价指标。

此种方法的优点在于能够将多目标问题转化为单目标问题,使得问题得以简化;缺点在于加权系数的选取规则不统一,在有些工况下不能判断出准确的加权系数,进而会导致整个多目标优化计算失去其本来的意义。

帕累托最优^[9]是一个博弈论中的概念,其原始的定义是:在不使任何人境况变坏的情况下,不可能再使某些人的处境变好。其数学定义^[10]如下。

对于一个多目标优化问题:

目标函数集合(最大值)

$$F(\bar{x}) = (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \cdots, f_n(\bar{x})) \quad (2)$$

定义域 $\bar{x} \in X$

对于 $\bar{x}^* \in X$, 其属于帕累托最优解的条件是:不存在另外一个 $\bar{x} \in X$, 使得对于所有的 i , 都有 $f_i(\bar{x}) \geq f_i(\bar{x}^*)$, 且至少存在一个目标函数, 使得 $f_i(\bar{x}^*) > f_i(\bar{x})$ 。

以一个两目标最大值函数优化问题为例进行说明。如图 1 所示, f_1, f_2 为目标函数, 在 A、B、C、D、E 5 个点中, 因为存在 $e_1 < b_1$ 且 $e_2 < b_2, d_1 < c_1$ 且 $d_2 < c_2$, 因此 D、E 为劣解, A、B、C 所构成的集合即为帕累托最优解集。在帕累托最优解集中, 所有个体之间没有优劣之分。

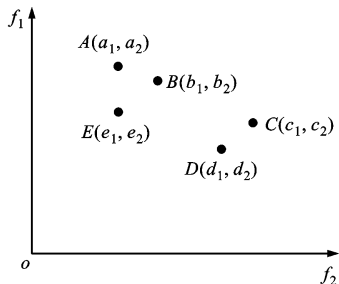


图 1 两目标函数帕累托最优解示意图

立足于工业产品的最直接目标——提高经济效益以及能源的高效利用原则——提高能源的利用率, 综合考虑上述两个方面的因素, 才能制定出较为综合全面的余热循环及循环工质评价方法。余热利

用评价 CE 图就是在上述思路的基础上提出的。其中, C 为年度现金流量, 它是系统经济效益的评价标准; E 为焓效率, 它是系统能量利用效率的评价指标。CE 图采用 C 作为纵坐标, E 作为横坐标, 以多目标遗传算法为优化工具, 绘制基于帕累托最优解集的曲线, 并以此作为余热回收循环系统对比和工质筛选的定量化评价方法。

2 多目标函数遗传算法简介

在以往的研究工作中, 传统的优化算法^[11] (例如最速降线法) 曾被用于热力循环参数的优化。针对类似于有机朗肯循环系统的影响因素较多的待优化体系, 传统的优化算法具有许多不可避免的劣势, 例如容易收敛于次优解等。遗传算法是由美国的 Holland 教授首次提出的^[12], 它是一种基于种群演变理论的优化算法, 被广泛使用于多变量问题的优化领域。遗传算法是一种仿生学的算法, 其理论基础是基于优胜劣汰的达尔文进化论, 通过模拟种群进化的过程进行选择、交叉、变异等仿生过程, 来达到筛选最优解的目的。

在遗传算法的运算过程中, 待优化的参数相当于种群进化中的基因序列。在本文中, 基因序列被定义为一个十进制的数组 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$, 这个数组所包含的元素便是待优化的参数。对于 BORC 和 IHORC 系统来说, 基因序列数组包含膨胀机入口压力和温度两个元素。适应度用 E 以及 C 表征。

计算程序使用 Fortran 语言自主编程, 不同工质的状态点的热力学参数通过调用 Refprop 8.0 软件所提供的子程序实现。

3 热力学模型与经济分析模型

3.1 热力学模型

BORC 与 IHORC 系统的 T - s 图分别如图 2 和图 3 所示。为了将实际问题简化为数学模型, 本文做出如下常规假设: ① 系统处于稳态运行状态; ② 管路热损失以及沿程压力损失忽略不计; ③ 其余常规参数见表 2。

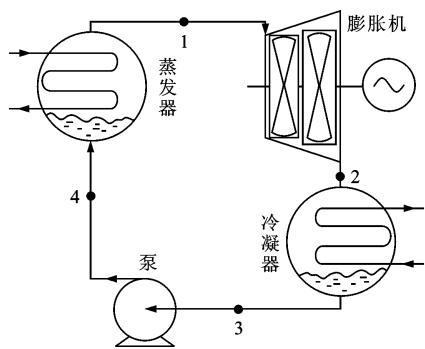
各个部件的焓损失 I 可用下式进行计算

$$I = T_0 \frac{dS}{dt} = mT_0 \left[\sum s_{out} - \sum s_{in} - \sum \frac{q_j}{T_j} \right] \quad (3)$$

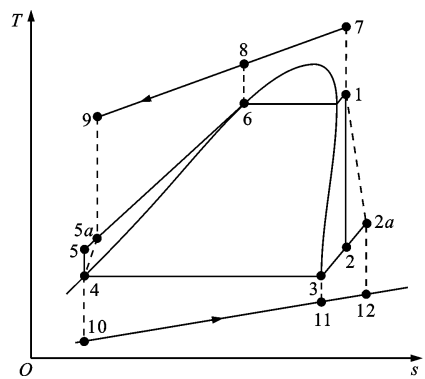
式中: T_j 为热源温度; q_j 为热源流体与循环工质之间的换热量。

循环泵与膨胀机的效率分别为

$$\eta_p = (h_5 - h_4) / (h_{5a} - h_4) \quad (4)$$

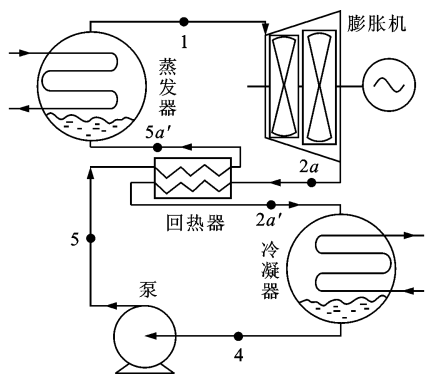


(a)基本有机朗肯循环示意图

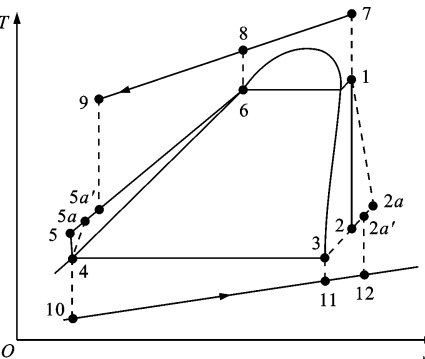


(b)基本有机朗肯循环 T-s 图

图 2 基本有机朗肯循环示意图和 T-s 图



(a)内回热有机朗肯循环示意图



(b)内回热有机朗肯循环 T-s 图

图 3 内回热有机朗肯循环示意图和 T-s 图

表 2 计算中假设的部分参数

参数	数值
热源流体流量 $m/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	14.0
热源流体比热容 $c_p/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.1
环境温度 T_0/K	298.0
环境压力 P_0/kPa	101.0
冷凝温度 T_c/K	303.0
膨胀机效率 η_{exp}	0.8
泵效率 η_p	0.7
回热器效率 σ	0.8
蒸发器夹点温差/ K	7.0
冷凝器夹点温差/ K	8.0

$$\eta_{\text{exp}} = (h_1 - h_{2a}) / (h_1 - h_2) \tag{5}$$

循环输出净功为

$$W_{\text{net}} = W_{\text{exp}} - W_p - W_{p,c} \tag{6}$$

其中 W_{exp} 为膨胀机的输出功,可表示为

$$W_{\text{exp}} = m(h_1 - h_{2a}) \tag{7}$$

循环泵的功耗为

$$W_p = m(h_{5a} - h_4) \tag{8}$$

$W_{p,c}$ 是冷却塔冷凝水泵的功耗,可用下式进行估算

$$W_{p,c} = m_{w,c} M_{\text{water}} \Delta P / (\rho_w \eta_{p,c}) \tag{9}$$

IHORC 系统中,回热器充当了冷凝器之前的“预冷器”以及蒸发器之前的“预热器”,通过回热器实现了系统内部的能量再利用。回热器的效率可定义为

$$\sigma = \frac{T_{2a} - T_{2a'}}{T_{2a} - T_{5a}} \tag{10}$$

根据热力学第一定律和第二定律,系统的热力学第一定律效率(热效率)可表示为

$$\eta_I = W_{\text{net}} / Q \tag{11}$$

系统的热力学第二定律效率(焓效率)可表示为

$$\eta_{II} = (E_{x_{\text{in}}} - \sum I) / E_{x_{\text{in}}} \tag{12}$$

其中 $E_{x_{\text{in}}}$ 是进入系统的总焓

$$E_{x_{\text{in}}} = Q(1 - T_0 / T_{m,hs}) \tag{13}$$

式中: T_0 是环境温度; $T_{m,hs}$ 是热源载体的对数平均温度。

热源流体的质量流量可根据能量守恒计算

$$m = c_{p,hs} m_{hs} (T_7 - T_8) / (h_1 - h_6) \tag{14}$$

$$m_{w,c} = m(h_3 - h_4) / (c_{p,c} (T_{11} - T_{10})) \tag{15}$$

3.2 经济分析模型

定义现金流量函数为

$$F = N_{\text{tot}} - C_{\text{tot}} \tag{16}$$

其中 N_{tot} 为年度总收入

$$N_{\text{tot}} = S W_{\text{ele}} h \tag{17}$$

式中: S 为电价(取 0.06 美元/(kW·h)); W_{ele} 为年度平均输出电量; h 为系统年度运行时间, 本次计算中选取常规值 7 500 h/a。

年度总消耗 C_{tot} 包括折旧费 C_{d} 和系统维护费 C_{OM} , 分别表示为

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{d}} + C_{\text{OM}} \tag{18}$$

$$C_{\text{d}} = \sum_K P_K [i(1+i)^n]/[(1+i)^n - 1] \tag{19}$$

式中: i 为银行利率(取 5%); n 为回收年限(取 20 a)。定义系统单位部件的造价为 P , 其中泵、蒸发器、膨胀机、冷凝器的造价可通过下式进行估算

$$\lg P = K_1 + K_2 \lg X + K_3 (\lg X)^2 \tag{20}$$

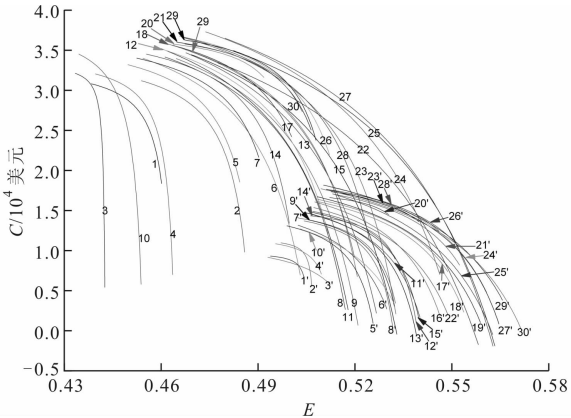
式中参数取值见文献[13]。

冷却塔冷凝水泵造价估算如下[14]

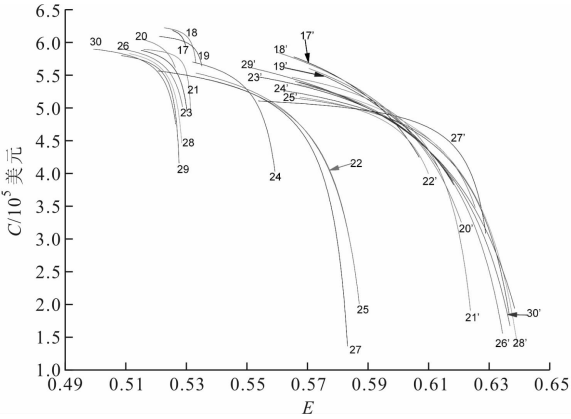
$$P_{\text{ct}} = 154\,179 (Q_{\text{c}}/5\,193)^{0.93} \tag{21}$$

LMTD 模型用于估算蒸发器、冷凝器以及回热器的换热面积

$$Q = UA \Delta T_{\text{m}} =$$



(a) 热源温度为 100 °C 时 BORG 和 IHORC 系统 CE 图



(c) 热源温度为 180 °C 时 BORG 和 IHORC 系统 CE 图

$$\frac{UA[(T_{\text{H},\text{in}} - T_{\text{C},\text{out}}) - (T_{\text{H},\text{out}} - T_{\text{C},\text{in}})]}{\ln[(T_{\text{H},\text{in}} - T_{\text{C},\text{out}})/(T_{\text{H},\text{out}} - T_{\text{C},\text{in}})]} \tag{22}$$

在蒸发器、冷凝器以及回热器中, 换热系数 U 分别取近似值 0.4、0.3、0.3 kW/(m²·K) 进行估算[15]。

系统维护费 C_{OM} 按照 C_{tot} 的 10% 计算[16]

$$C_{\text{OM}} = 0.1 C_{\text{tot}} \tag{23}$$

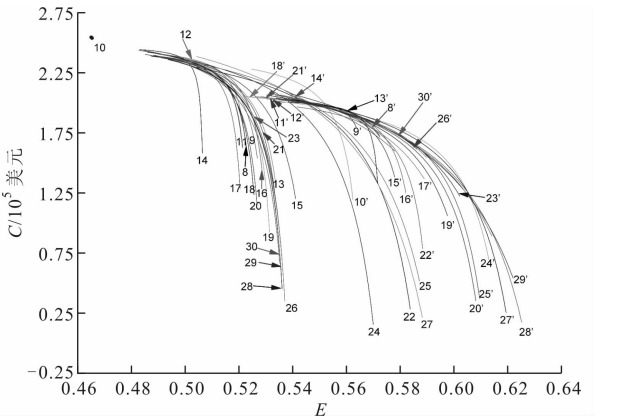
4 CE 图的制作及应用

4.1 CE 图的制作

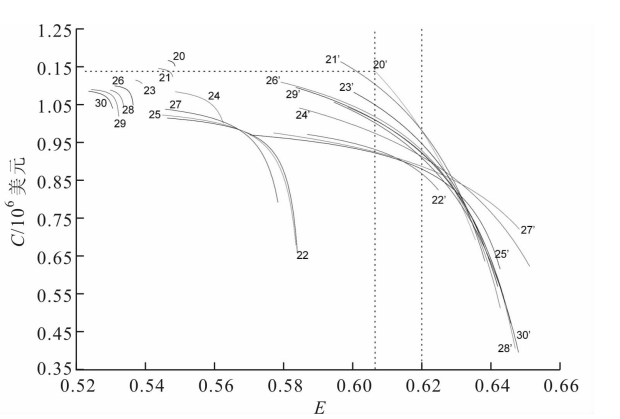
对不同热源温度(100~300 °C 区间)、30 种不同有机工质(根据蒙特利尔协议, 剔除含氯工质)、不同循环系统(BORG、IHORC)进行分批求解。当热源温度接近工质的临界温度时, 较小的压力变化将会引起较大的温度变化, 系统稳定性降低, 因此本文只考虑亚临界状态下的循环。对帕累托解集进行非线性拟合, 发现所有解集均很好地符合下述公式

$$C = P_1 + P_2 P_3 / (P_3 + E) \tag{24}$$

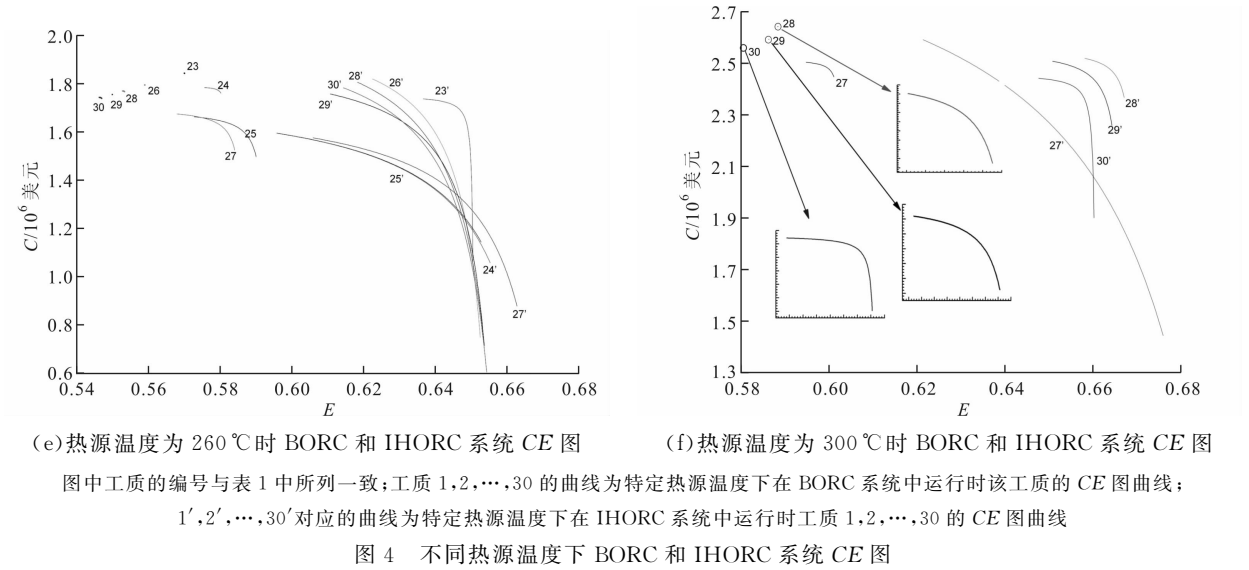
每种工况、不同工质在不同系统中均具有特定的特征参数 P_1 、 P_2 、 P_3 , 所绘制的 CE 图见图 4。



(b) 热源温度为 140 °C 时 BORG 和 IHORC 系统 CE 图



(d) 热源温度为 220 °C 时 BORG 和 IHORC 系统 CE 图



4.2 CE 图中曲线端点的意义

CE 图中曲线的端点表示特定系统在特定工况、特定工质下能够取得的最大年度现金流量以及焓效率。图 5 为 Isopentane-140℃-IHORC 系统的 CE 图,其中端点分别用 A 和 B 表示。A 的纵坐标为系统在该种工质、该种工况下能够获得的最大年度现金流量(约 20.55 万美元),A 点的横坐标即在取得最大年度现金流量时系统所对应的焓效率;B 点的横坐标为在该种工质、该种工况下能够获得的最大焓效率(0.57),B 点的纵坐标是在取得最大焓效率时系统能够获得的年度现金流量。因此,通过 CE 图的端点,可以获得特定系统在特定工况和特定工质下运行时所能够获得的最大焓效率和最大年度现金流量。

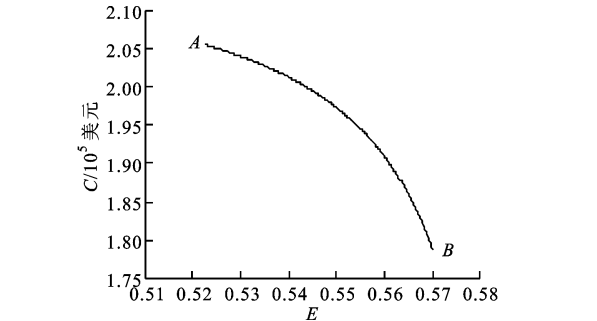


图 5 Isopentane-140℃-IHORC 系统 CE 图

4.3 利用 CE 图进行特定工况下工质优劣性判断

通过对不同工质的 CE 图进行对比,可实现特定工况下不同工质优劣性的量化对比。对于相同循环类型及循环工况,不同工质对应的 CE 图存在以下两种情况。

(1)CE 图中曲线不相交。以图 6 为例,对于此种情况,在获得相同焓效率的前提下,工质 R245ca

具有比工质 Cis-butene 更大的年度现金流量($d_1 > c_1$);同理,在系统获得相同的年度现金流量时,工质 R245ca 具有比 Cis-butene 更大的焓效率($b_2 > a_2$)。因此,可以认为在此种特定工况和特定系统下,工质 R245ca 优于 Cis-butene。

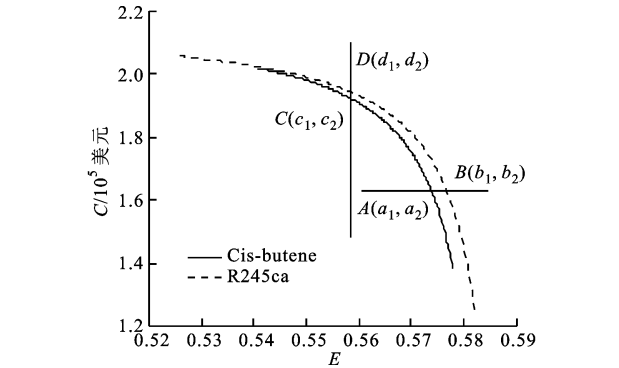


图 6 IHORC-140℃下 Cis-butene、R245ca 两种工质的 CE 图

(2)CE 图中曲线相交。如图 7 所示,此时需要分情况讨论,需要结合实际的需求来对工质的优劣性进行评价。例如图 7 中两条 CE 曲线的交点 P 约出现在焓效率为 0.55 处,此时年度现金流量为 20 万美元。以此为分界点,分下面两种情况进行讨论。①若系统所处的实际余热环境侧重于能量利用,在保证焓效率必须大于 0.55 的前提下,始终有 $h_1 > g_1$ 且 $f_2 > g_2$,即在与工质 Neopentane 获得相同的焓效率时,工质 Heptane 具有较大的年度现金流量;与工质 Neopentane 获得相同的年度现金流量时,工质 Heptane 具有较大的焓效率。因此,认为在此区域中工质 Heptane 优于 Neopentane。②若系统所处的实际余热环境侧重于经济收益,在保证年度现金流量必须大于 20 万美元的前提下,始终有

$d_1 > c_1$ 且 $a_2 > b_2$, 即在与工质 Heptane 获得相同的烟效率时, 工质 Neopentane 具有较大的年度现金流量; 与工质 Heptane 获得相同的年度现金流量时, Neopentane 具有较大的烟效率。因此, 认为在此区域中工质 Neopentane 优于 Heptane。

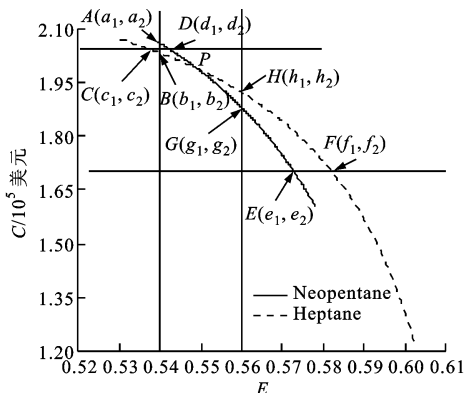


图7 IHORC-140℃下 Neopentane、Heptane 两种工质的 CE 图

4.4 利用 CE 图进行特定工况下系统优劣性判断

通过对不同系统的 CE 图进行对比, 可实现特定工况下不同余热利用系统优劣性的定量化比较。常见的有两种情况, 根据图 4, 分以下两种情况进行阐述。

(1) CE 图中, 两种系统各自所对应的 CE 图曲线坐标覆盖面积没有重合的区域。图 8 为 R365mfc-180℃时两种系统的 CE 图, 在此工况下运行时, BORC 系统具有较高的经济效率, IHORC 系统具有较大的能量利用效率, 并且 BORC 系统在达到最高烟效率时所获得的最小年度现金流量甚至要比 IHORC 系统在最小烟效率时所获得的最大年度现金流量还要高。因此, 此时两种系统分别是经济主导型和能量利用主导型, 可根据系统所处的实际余热环境进行筛选。

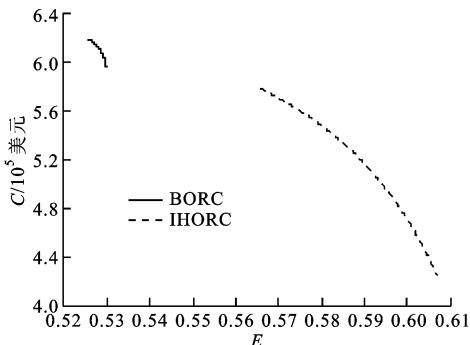


图8 R365mfc-180℃时两种系统的 CE 图

(2) CE 图中, 两种系统各自所对应的 CE 图曲线坐标覆盖面积有重合的区域。图 9 为 Acetone-180℃时两种系统的 CE 图。此时, 可按照烟效率 (横坐标) 的值依次进行分区阐述。①A-B 段: 在此

区域中, BORC 系统牺牲烟效率来提高年度现金流量, 若对经济效益特别强调, 可选择本段工况, 此时可选的系统只有 BORC 系统 (IHORC 系统无法获得如此高的年度现金流量)。②B-C 段: 在此区域中, 获得相同年度现金流量的前提下, IHORC 系统具有更高的烟效率, 因此此段区域中 IHORC 系统为比较有优势的循环。③C-D 段: 在此区域中, 获得相同烟效率的前提下, IHORC 系统能够获得具有更高的年度现金流量, 认为此时 IHORC 系统为比较有优势的循环。④D-E 段: 在此区域中, IHORC 系统牺牲年度现金流量来提高烟效率, 若系统强调能量利用效率, 可选择本段工况, 此时可选的系统只有 IHORC 系统 (BORC 系统无法获得如此高的烟效率)。

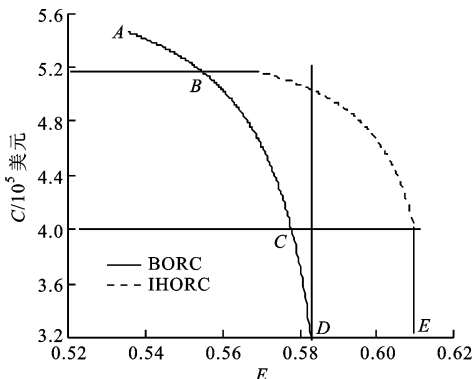


图9 Acetone-180℃时两种系统的 CE 图

4.5 CE 图用途扩展及展望

(1) 随着余热利用循环研究的不断深入, 许多新的余热利用循环、循环工质也逐渐诞生。余热利用评价 CE 图作为一种余热利用系统及工质优劣性评价的工具, 其应用范围不仅在于对现有的系统 (例如 ORC、Kalina 等)、工质进行评价, 同样适用于对新开发的系统、工质进行综合评价。

(2) 余热利用评价 CE 图不仅适用于纯发电系统, 同样适用于热电联产、冷电联产、冷热电联产等多种形式的余热利用系统。

(3) 余热利用评价 CE 图的概念不仅仅局限于使用年度现金流量和烟效率作为目标函数, 也可以根据实际工业环境选择其他的目标函数, 能更加灵活地应用于具体的工业实际。

5 结 论

(1) 鉴于当前余热利用循环的系统优劣性评价和工质的筛选缺乏定量的方法和评价准则, 本文以多目标函数帕累托最优解为基本思想, 以多目标函

数遗传算法为实现手段,在综合考虑年度经济收益及能量利用效率的基础上,提出了余热利用评价CE图。

(2)给出了CE图的制作方法,以BORC和IHORC系统及其在100~300℃之间的不同余热温度下采用的30种常见有机工质为例,绘制出了上述各种工况下的CE图。

(3)分析说明了CE图中各特殊点的意义,解释说明了所提出的CE图如何用来评价余热利用循环系统的优劣性,以及如何用来进行工质的筛选,还对不同系统、不同工质CE图的对比方法进行了阐述,并且对CE图在余热利用领域的进一步开发利用进行了展望。

综上所述,基于多目标函数优化帕累托最优解思想的余热利用评价CE图,能够实现余热利用循环的系统优劣性定量评价和工质的定量对比,并且有望在余热利用领域中系统对比、工质筛选以及性能参数优化等方面得到进一步的应用。

参考文献:

- [1] XU Rongji, HE Yaling. A vapor injector-based novel regenerative organic Rankine cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 31(6/7): 1238-1243.
- [2] SUN Faming, Ikegami Yasuyuki, JIA Baoju, et al. Optimization design and exergy analysis of organic Rankine cycle in ocean thermal energy conversion [J]. *Applied Ocean Research*, 2012, 35: 38-46.
- [3] WANG Z Q, ZHOU N J, GUO J, et al. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat [J]. *Energy*, 2012, 40(1): 107-115.
- [4] WANG X D, ZHAO L. Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 605-613.
- [5] MAIZZA V, MAIZZA A. Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 21(3): 381-390.
- [6] WANG Jiangfeng, DAI Yiping, GAO Lin. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(6): 941-948.
- [7] SYLBAIN Q, SEBASTIEN D, BERTRAND F, et al. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14/15): 2885-2893.

- [8] KONAKA A, COITB D W, ALICE E S. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(9): 992-1007.
- [9] 李倩, 詹浩, 朱军. 基于 Pareto 遗传算法的机翼多目标优化设计研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(1): 134-137.
LI Qian, ZGAN Hao, ZHU Jun. Exploring combination of Pareto genetic algorithm (GA) with aerodynamic analysis software for multi-objective optimization of wing [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(1): 134-137.
- [10] QU B Y, SUGANTHAN P N. Multi-objective evolutionary algorithms based on the summation of normalized objectives and diversified selection [J]. *Information Sciences*, 2010, 180(17): 3170-3181.
- [11] MADHAWA H H D, MIHAJLO G, WILLIAM M W, et al. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low temperature geothermal heat sources [J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1698-1706.
- [12] HOLLAND J H. Adaptation in nature and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence [M]. Massachusetts, USA: MIT Press, 1992.
- [13] TURTO R, BAILIE R C, WHITING W B. Analysis, synthesis and design of chemical processes [M]. 2nd ed. Old Tappan, USA: Prentice Hall, 2003.
- [14] HOBANA M, GERBERB L, MARECHALB F. Integrated thermo-economic modeling of geothermal resources for optimal exploitation scheme identification [C/OL]//23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems, Lausanne, Switzerland, June 14-17, 2010 [2013-02-05]. <http://www.ecos2010.ch/>.
- [15] SOTOMONTE C A R, CAMPOS C E, LEME M, et al. Thermo-economic analysis of organic Rankine cycle cogeneration for isolated regions in brazil [C/OL]//25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems, Perugia, Italy, June 26-29, 2012 [2013-02-05]. <http://ecos2012.org/ocs/index.php?conference=ecos12&schedConf=ECOS2012>.
- [16] VALDES M, DURAN M D, ROBIRA A. Thermo-economic optimization of combined cycle gas turbine power plants using genetic algorithms [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(17): 2169-2182.

(编辑 荆树蓉)