

研究论文

ORC 工质选择的多级非结构性模糊决策分析

许俊俊¹, 罗向龙¹, 王永真¹, 朱倩南¹, 陈颖¹, 莫松平¹, 黄宏宇²

(¹广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006; ²中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510650)

摘要: 工质的选择是有机朗肯循环 (ORC) 系统优化中的关键问题之一。建立了基于多级非结构性模糊决策分析方法的 ORC 工质优选体系, 根据影响因素的非结构性的特点建立三级模糊优选模型, 综合考虑 ORC 系统的技术性能、经济性能和环保性能 3 方面因素的影响, 并针对影响 ORC 工质优选的因素复杂、确定隶属函数主观因素较强的情况引入非结构性模糊决策法以确定其隶属度与权重。应用此模型对 150℃ 热源条件下某 ORC 系统进行工质的优选, 得到了不同评价级对应的优选工质序列。R123 是对应三级评价准则下该 ORC 系统的最优工质, 验证了多级非结构性模糊决策模型在 ORC 工质优选中的适用性。

关键词: 有机朗肯循环; 工质优选; 多级模糊优化; 非结构性模糊决策; 过程系统; 模型; 优化设计

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20140855

中图分类号: TK 11⁺5

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 03—1051—08

Optimum selection of ORC working fluid using multi-level fuzzy optimization and non-structural fuzzy decision

XU Junjun¹, LUO Xianglong¹, WANG Yongzhen¹, ZHU Qiannan¹,
CHEN Ying¹, MO Songping¹, HUANG Hongyu²

(¹School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; ²Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: Selection of working fluid is one of the key issues in the organic Rankine cycle (ORC) waste-heat power generation technology. Multi-criteria methods for working fluid selection are urgent to be studied. Existing researches are mostly under the constraints of specific thermodynamic and structural conditions. Contradictory findings exist in many studies, because there is no general optimization method for ORC working fluid selection. A method using multi-level fuzzy optimization and non-structural fuzzy decision was developed to solve the problem. Comprehensive considerations of technical, economic performance and environmental protection of ORC systems are presented. Since the factors that influence ORC working fluid selection are multi-level and non-structural, establishment of a three-level fuzzy optimization model to obtain a more satisfactory result is preferable.

Key words: ORC; working fluid selection; multilevel fuzzy optimization; non-structural fuzzy decision; process systems; model; optimal design

2014-06-06 收到初稿, 2014-12-03 收到修改稿。

联系人: 罗向龙。第一作者: 许俊俊 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51476037); 广州市珠江科技新星项目 (2013J2200096)。

Received date: 2014-06-06.

Corresponding author: LUO Xianglong, lxl-dte@gdut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51476037) and the Guangzhou Pearl River Technology Star Project (2013J2200096).

引 言

采用有机朗肯循环 (ORC) 将低品位热能 (太阳能、生物质能、地热能、各种余热等) 转化为电能, 是提高能源利用效率和降低环境污染的有效途径之一, 工质的选择对 ORC 系统综合性能有着决定性的影响^[1]。在过去的几年里, 国内外学者^[1-5]基于热力学第一定律效率、第二定律效率和热经济性等单一评价指标在 ORC 工质选择上做了大量的工作, 得到了很多有价值的结果^[6]。然而传统的 ORC 工质选择设计中, 设计者往往根据具体的操作工况采用经典数学方法进行选择计算, 决策者也以“非此即彼”的思想对计算结果进行决策。显然, 工质的优选受到其运行工况、热力性能、循环效率、经济性、环保性、安全性等多方面因素影响, 靠单一的评价指标很难将这些具有不同层次和类别的因素进行量化分析, 而且优化结果甚至相悖。如 Liu 等^[7]基于热力学第一定律的评价认为 ORC 热效率是工质临界温度的弱函数; 而 Aljundi^[8]选取热效率、焓效率和质量流量作为评价指标, 其研究表明 ORC 热效率是工质临界温度的强函数, 与前者的结论完全相反。再如 Tian 等^[9]的研究表明 R141b、R123 和 R245fa 这 3 种工质有较高的第一定律效率和输出功, 但其对应的单位发电成本较高, 单位面积输出功所需换热器面积也较大。因此, 靠单一指标简单评价的方法是不够完善的, 工质的优选必须是综合考虑众多影响因素之后的结果, 而建立多种评价指标以及基于这些评价指标的 ORC 工质优选方法是当前 ORC 研究面临的难题之一。

ORC 系统性能的评价指标主要从三方面考虑: 一是有机物工质的物性参数, 包括工质的物理化学特性、稳定性、环保性等; 二是 ORC 系统的技术性指标, 包括系统热效率、焓效率、输出净功、热回收率等; 三是系统的经济性评价指标, 如设备投资成本、发电成本、单位焓成本、初投资年度化成本等。由于很难选择一种工质使得以上指标在各种参数条件和运行工况下均达到最优, 基于多评价指标的优选方法得到了学者们的关注, 多目标优化是其中的一种。Wang 等^[10]利用遗传算法建立 ORC 系统多目标优化模型, 得到了两个优化目标 (循环热效率和总投资成本) 之间的帕累托权衡曲线; 王志奇等^[11]建立了以热回收效率和单位输出功所需的换热器面积为目标的 ORC 系统多目标参数优化模

型, 利用模拟退火算法求解。尽管多目标优化给出了各单目标对应的最优目标及多目标权衡下的各单目标取值上下限, 最终的决策还是基于决策者主观上对各目标的偏好, 而且当目标多于 3 个时, 结果很难直观表示。

与多目标优化相对应的另一种基于多评价指标的优化方法为多属性决策^[12], 其一般思路是基于模糊数学的方法对各评价指标或属性进行量化, 通过严格的模糊数学过程得到归一化的评价指标, 并对该指标进行排序, 决策者可以根据该归一化的评价指标顺序进行方案优选。多属性决策方法中问题目标是有限的, 决策变量是离散的, 既可以是定量的, 也可以是定性的。常用的多属性决策方法如简单加权法 (SAW)、接近理想点法 (TOPSIS)、层次分析法 (AHP) 和非结构性模糊决策法 (NSFDM) 等^[13], 在换热器设计^[14]、海洋平台设计选型^[15]等方面已有广泛的运用。

ORC 工质的优选属于典型的多属性决策问题, 本研究基于多级模糊优选决策理论^[16]建立 ORC 工质优选的分层次评价指标, 利用优先关系法将影响 ORC 工质选择的半结构性模糊因素进行量化, 通过建立模糊优选模型进行多级模糊优选, 以获得 ORC 工质优选序列。

1 多级非结构性模糊优选方法

方案优选的实质是综合考虑了大量技术、经济、环境等因素的决策问题。在决策时, 因素的评价往往具有一定的不确定性, 这些不确定性主要来自指标特征值的随机性和模糊性。对于随机性, 通常采用概率统计学方法。而模糊性是指存在于客观事物、概念在共维条件下差异之间的过渡状态。对于模糊性, 可采用模糊数学中的模糊集理论解决, 此类评价称为模糊综合评价。

决策问题的关键是确定因素的隶属度和权重。在多属性决策问题中, 属性值定性 with 定量相混合。同时需要处理的因素指标较多, 所构成的因素集常常是非结构性的, 即指标特征值部分已知、部分未知。对于此类非结构性问题, 通常采用非结构性模糊决策分析法。

ORC 工质的优选问题是包含了多种不确定参数的非结构性多属性决策问题。适合采用多级模糊优选理论, 并应用非结构性模糊决策分析法确定因素的隶属度和权重。多级非结构性模糊优选流程如

图 1 所示。

1.1 多级模糊优选

从现有的研究可知^[1,4,6-9], 影响 ORC 工质选择的因素很多, 这些因素具有不同的层次和类别, 同时各个因素之间也存在较强的相关性。如果对这些影响因素进行单级模糊优选, 其权重很难合理分配, 而且权重集中各权的权重太小, 会出现大量“泯灭”的影响。针对这一问题, 翟钢军等^[15]在海洋平台设计选型中借鉴层次分析法对影响因素进行不同的级别划分, 其规则是按照因素的重要程度进行级别划分, 同时在运算中要求将上一级的优选结果带入下一级运算, 使下一级的运算充分考虑到上一级因素的影响, 较好地体现了各影响层之间的相关性。

1.2 非结构性模糊决策法

ORC 工质优选的影响因素包括结构性因素和非结构性因素, 因此在 ORC 工质优选中因素集是半结构性的。而确定各个因素对决策集的相对隶属度是确定模糊关系矩阵的关键。对于非结构性决策问题, 陈守煜^[16]提出了非结构性决策模糊集分析单元系统理论。其主要特点是: 以比较符合我国语言与思维习惯的互补性作为二元对比的判断准则, 严格区别重要性与优越性等概念的含义。对于半结构

性问题, 应用因素之间的优先关系二元对比方法可以将这些模糊影响因素量化, 从而得到各因素的相对隶属度。

2 多级模糊优选模型

2.1 建立因素集和因素层次集

影响 ORC 工质选择的因素集为

$$U=(C_1, C_2, \dots, C_p) \quad (1)$$

借鉴层次分析法, 按照因素对优选结果的影响的重要性将模糊因素集进行划分。以三级划分为例, 一级为最次要影响因素, 二级为次要影响因素, 三级为重要影响因素, 得到层级划分如下

$$\left\{ \begin{array}{l} [C_1, C_2, \dots, C_i] \Rightarrow B_1 \\ [C_{i+1}, C_{i+2}, \dots, C_j, B_1] \Rightarrow B_2 \\ [C_{j+1}, \dots, C_p, B_2] \Rightarrow B_3 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, B_1 、 B_2 、 B_3 分别为第一级、第二级、第三级因素对应的模糊优选评判集。

2.2 建立因素权重集和因素层权重集

因素的权重集准确反映了各因素的重要程度, 对各因素 C_i 赋予相应的权重 ω_i , 表示为

$$W=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p) \quad (3)$$

$$W_b=(\omega_{b1}, \omega_{b2}) \quad (4)$$

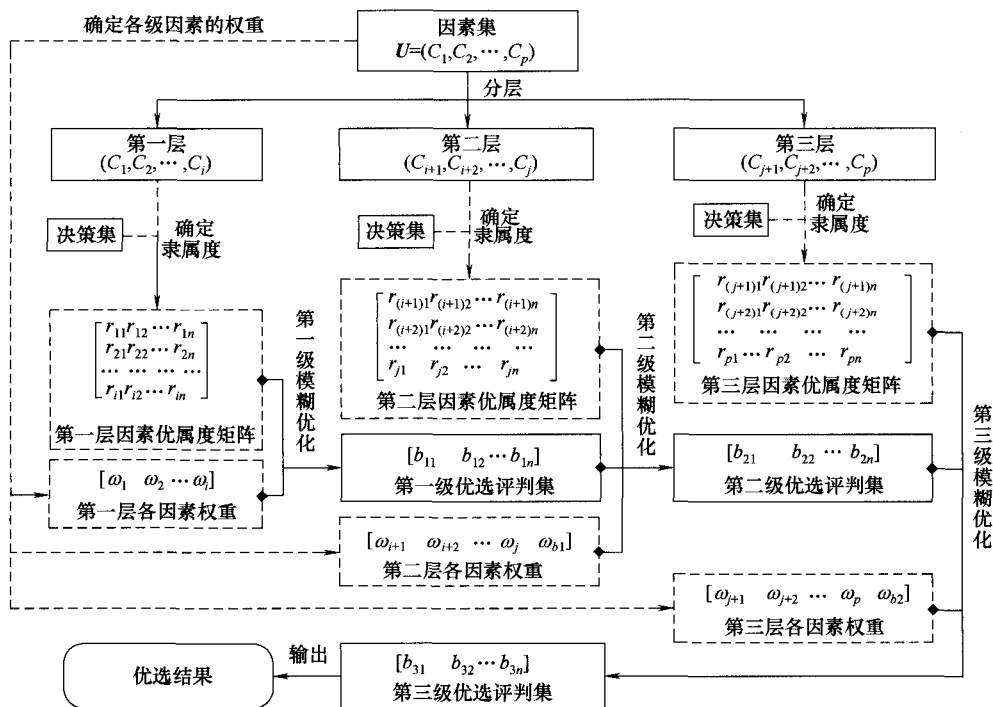


图 1 多级非结构性模糊优选流程

Fig. 1 Procedure of multi-level and non-structural fuzzy optimization

式中, ω_{b1} 、 ω_{b2} 分别表示第一级与第二级、第二级与第三级之间的二元优先关系。

2.3 建立模糊优选决策集

本研究的优选对象是有机工质的种类, 结合已有文献的研究选取合适的候选工质构成决策集体

$$V=(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (5)$$

式中, v_i 代表第 i 个决策方案。

2.4 三级模糊优选

三级模糊优选过程如下。

(1) 一级模糊优选 第一层因素模糊优选矩阵

R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p_1 1} & r_{p_1 2} & \dots & r_{p_1 n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, r_{ij} 代表第 j 个方案在第 i 个因素下的相对隶属度。

权重集 W_1 为

$$W_1=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{p_1}) \quad (7)$$

将第一层因素模糊优选矩阵 R_1 与其对应的权重集 W_1 进行模糊运算, 得到一级模糊优选评判集

$$B_1=W_1 \cdot R_1=(b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}) \quad (8)$$

(2) 二级模糊优选 第二层因素模糊优选矩阵 R_2 为

矩阵 R_2 为

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_{(p_1+1)1} & r_{(p_1+1)2} & \dots & r_{(p_1+1)n} \\ r_{(p_1+2)1} & r_{(p_1+2)2} & \dots & r_{(p_1+2)n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p_2 1} & r_{p_2 2} & \dots & r_{p_2 n} \\ b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

权重集 W_2 为

$$W_2=(\omega_{p_1+1}, \omega_2, \dots, \omega_{p_2}, \omega_{b1}) \quad (10)$$

将第二层因素模糊优选矩阵 R_2 与其对应的权重集 W_2 进行模糊运算, 得到二级模糊优选评判集

$$B_2=W_2 \cdot R_2=(b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2n}) \quad (11)$$

同理进行第三级模糊优选, 得到三级模糊优选评判集。

2.5 模糊决策分析

由最大隶属度原则, 取三级模糊优选评判集中最大的优化指标所对应的决策集中的有机工质作为模糊决策的优选结果。

3 用非结构性模糊决策法确定因素的相对隶属度及权重

3.1 因素的相对隶属度确定

给出因素 C_i 的标度矩阵, 以确定在因素 C_i 下决策集对优的定性排序

$$E^i = \begin{bmatrix} e_{11}^i & e_{12}^i & \dots & e_{1n}^i \\ e_{21}^i & e_{22}^i & \dots & e_{2n}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{n1}^i & e_{n2}^i & \dots & e_{nn}^i \end{bmatrix} = (e_{kl}^i) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} \text{若 } v_k \text{ 比 } v_l \text{ 优越: 取 } e_{kl}^i=1, e_{lk}^i=0 \\ \text{若 } v_l \text{ 比 } v_k \text{ 优越: 取 } e_{kl}^i=0, e_{lk}^i=1 \\ \text{若 } v_k \text{ 与 } v_l \text{ 同样优越: 取 } e_{kl}^i=0.5, e_{lk}^i=0.5 \end{cases} \quad (13)$$

根据优越性排序一致性原理, 若满足条件

$$\begin{cases} (1) \text{ 当 } e_{hk}^i > e_{hl}^i \text{ 时, 有 } e_{kl}^i=0 \\ (2) \text{ 当 } e_{hk}^i < e_{hl}^i \text{ 时, 有 } e_{kl}^i=1 \\ (3) \text{ 当 } e_{hk}^i = e_{hl}^i = 0.5 \text{ 时, 有 } e_{kl}^i=0.5 \end{cases} \quad (14)$$

则称矩阵 E^i 为优越性排序一致性标度矩阵。将一致性标度矩阵 E^i 的每一行求和, 并按降序排列, 得到标度的定性排序 R_j^i 。

为了在二元定量对比中更易于按我国的语言习惯给出定量标度 a_{ij} , 陈守煜^[16]建立了语气算子与定量标度之间的对应关系, 视语气算子的强弱将其分为 20 个语气算子级差, 优先关系相同则赋值 0.5, 完全不同则赋值 1, 中间根据重要性关系强弱进行划分。根据排序情况给每一个标度进行量化并赋予相应的语气算子。 a_{ij} 可以表示为

$$a_{ij} = 0.475 + 0.025R_j^i \quad (15)$$

因素 C_i 对优的相对隶属度 r_{ij} 为

$$r_{ij} = \frac{1 - a_{ij}^i}{a_{ij}^i} \quad (16)$$

使用该公式确定的语气算子与定量标度及相对隶属度的对应关系见表 1。

3.2 因素权重的确定

各因素权重计算的实质是计算因素之间的相对优先关系。采用非结构性模糊决策法确定权重, 其基本原理与确定因素的隶属度一致, 即对各个评价因素进行二元对比排序, 参照表 1 赋值得到对应的标度矩阵, 再进行归一化即可得到各因素的权重。

3.3 各层评判集权重的确定

第 i 层评判集的权重计算, 可采用式 (17)^[13]。

表 1 语气算子与定量标度及相对隶属度的对应关系

Table 1 Semantic operator, scores and transformed

Semantic operators	priority scores		Priority score r_{ij}
	Qualitative ranking R_j	Quantitative score a_{ij}	
same	1	0.500	1.000
	2	0.525	0.905
marginally	3	0.550	0.818
	4	0.572	0.736
slightly	5	0.600	0.667
	6	0.625	0.600
quite	7	0.650	0.538
	8	0.675	0.481
markedly	9	0.700	0.429
	10	0.725	0.379
obviously	11	0.750	0.333
	12	0.775	0.290
very	13	0.800	0.250
	14	0.825	0.212
significantly	15	0.850	0.176
	16	0.875	0.143
very significantly	17	0.900	0.111
	18	0.925	0.081
extremely	19	0.950	0.053
	20	0.975	0.026
absolutely incomparable	21	1	0

$$\omega_{bi} = \frac{1}{n_{i+1} + 1} \quad (17)$$

式中, n_{i+1} 为第 $i+1$ 因素层中因素的个数。

4 实例应用

本研究根据表 2 给出的废热源的参数, 利用 MATLAB 建立亚临界有机朗肯循环发电系统模型, 计算不同工质条件下的循环性能参数。

表 2 废热源基本参数

Table 2 Technological parameters of heat source

Parameter	Value
type	waste oil
temperature	150°C
pressure	101 kPa
volume flow rate	2057 L · h ⁻¹
specific heat	2893.73 J · kg ⁻¹ · K ⁻¹

4.1 建立因素集和决策集

影响 ORC 工质优选的因素很多, 在具体仿真模型所获得的计算数据的基础上选取具有代表性的 8 个因素构成模糊优选因素集, 并以安全环保性、系统热力性能、经济性能为依据将这些因素分为 3

个等级。参考现有文献的研究^[1,3]选取了 5 种适合 150°C 低温热源 ORC 发电系统的有机工质构成优选决策集。对应的综合评价层次结构如图 2 所示。

根据模拟热源的条件建立 ORC 性能计算模型, 利用计算机程序计算各方案的性能参数, 其中工质的安全性、环保性参数查询相关技术手册获得。图 3 给出了 ORC 发电系统的温熵图, 热力性能和经济性能参数所用到的计算公式在表 3 中给出。各因素的参数见表 4。

4.2 确定因素的相对隶属度及权重

按照二元对比原理对每一个决策因素进行各种方案的二元对比分析, 经一致性检查后对各因素的定量标度进行计算和排序; 根据表 1 给出的相对隶属度与语气算子对应关系, 按照排序顺序赋予相应的语气算子; 最后将赋值结果进行归一化处理,

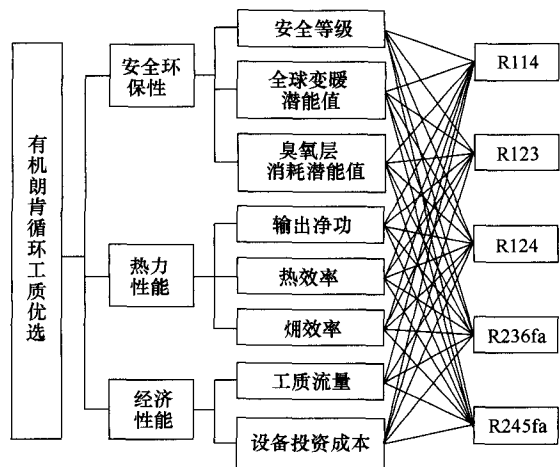


图 2 综合评价层次结构

Fig. 2 Comprehensive assessment block diagram of working fluid selection of ORC

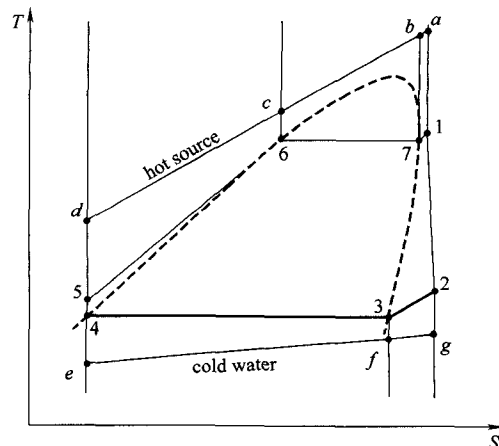


图 3 ORC 低温热源发电系统温熵图

Fig. 3 T-S diagram of organic Rankine cycle

表 3 因素计算公式和数据来源

Table 3 Calculation equations for different criteria

Criterion	Calculation formula
1 net output power /kW	$W_{NET} = W_{TUR} - W_{PUMP}$
2 thermal efficiency/%	$\eta_1 = W_{NET} / Q_{EVA}$
3 energetics efficiency /%	$\eta_2 = W_{NET} / [Q_{EVA}(1 - T_L / T_H)]$
4 working medium flow /kg · s ⁻¹	$M_{FLU} = Q_{HOT} / (h_1 - h_5)$
5 equipment cost/yuan	$TPEC = PEC_{HE} + PEC_{PUMP} + PEC_{TUR}$ $PEC_{HE} = 10000 + 324A^{0.91} [17]$ $PEC_{PUMP} = 422 W_{PUMP}^{0.71} [1.41 + 1.41 \times (1 - 0.8)(1 - \eta_{PUMP})]^{1.18}$ $PEC_{TUR} = 6000 W_{TUR}^{0.70} [19]$

表 4 方案各项指标及参数

Table 4 Technological parameters of available options

Criterion	R114	R123	R124	R236fa	R245fa
safety class	A1	B1	A1	A1	B1
GWP/100y	9800	120	480	210	9400
ODP/R11	0.850	0.012	0.022	0.010	0
net output power /kW	5.56	5.09	6.09	6.29	5.43
thermal efficiency /%	10.36	10.85	10.23	9.95	10.63
energetics efficiency /%	37.95	39.77	37.48	36.44	38.97
working medium flow /kg · s ⁻¹	0.33	0.22	0.35	0.35	0.22
equipment cost /yuan	33664	32658	36098	36402	32952

得到各个因素的相对隶属度指标。以安全等级因素为例确定各方案在该因素下的相对隶属度，计算过程见表 5。其他因素的相对隶属度的计算结果见表 6。

表 5 安全等级因素二元对比排序结果与相对隶属度确定

Table 5 Output of pair-wise comparisons and semantic score considering safety class

Working medium	R114	R123	R124	R236fa	R245fa	Sum	Ranking	Quantitative score	Weighting
R114	0.5	1	0.5	0.5	1	3.5	1	0.8180	0.2395
R123	0	0.5	0	0	0.5	1	2	0.8180	0.2395
R124	0.5	1	0.5	0.5	1	3.5	1	0.8180	0.2395
R236fa	0.5	1	0.5	0.5	1	3.5	1	0.4810	0.1408
R245fa	0	0.5	0	0	0.5	1	2	0.4810	0.1408

表 6 各方案的相对隶属度

Table 6 Weighting of each element after normalization

Working medium	Safety class	GWP	ODP	Net output power	Thermal efficiency	Energetics efficiency	Working medium flow	Equipment cost
R114	0.2395	0.1243	0.1243	0.1932	0.1932	0.1932	0.1940	0.1932
R123	0.1408	0.2897	0.1932	0.1243	0.2897	0.2897	0.2632	0.2897
R124	0.2395	0.1932	0.1559	0.2370	0.1559	0.1559	0.1399	0.1559
R236fa	0.2395	0.2370	0.2370	0.2897	0.1243	0.1243	0.1399	0.1243
R245fa	0.1408	0.1559	0.2897	0.1559	0.2370	0.2370	0.2632	0.2370

同理，对各因素按照重要性不同在各因素层内进行二元对比排序，归一化处理后得到各因素的权重。其中，第一级因素的权重为

$$W_1 = \{0.4036, 0.2982, 0.2982\} \quad (18)$$

第二级和第三级因素层分别有 3 个和 2 个因素指标，利用式 (17) 计算得到第一级和第二级评判集的权重分别为 0.25、0.33，进行归一化处理后得到第二级和第三级因素的权重如下

$$W_2 = \{0.3018, 0.2013, 0.2469, 0.2500\} \quad (19)$$

$$W_3 = \{0.3000, 0.3667, 0.3333\} \quad (20)$$

4.3 三级模糊优选计算

根据第一级隶属度矩阵 R_1 与因素权重集 W_1 的方案隶属度和因素的权重，利用式 (21) 进行模糊优选计算，得到第一级模糊优选评判集 B_1 。

$$B_i = W_i \cdot R_i \quad (21)$$

式中， i 为第 i 级因素层。

将 B_1 作为第二级隶属度矩阵 R_2 的最后一行参与运算，得到第二级模糊优选评判集 B_2 ，并按照同样的方法将其列入第三级进行模糊优选计算。

按照最大隶属度原则，选取各级优选评判集中最大指标对应的工质种类作为该级模糊优选决策的结果。图 4 给出了本案例三级模糊优选计算结果。从模糊优选结果可以看出：在只考虑有机工质的安全等级和环保特性的情况下，R236fa 的性能最优，其次是 R123 和 R124；进一步考虑系统热力性能指标后，排序最优的 3 种工质分别为 R123、R236fa 和 R245fa；综合考虑经济性因素之后，R123 评价值最高，其次是 R245fa 和 R114。优选结果表明 R123

是该 150℃ 热源条件下综合性能指标最优的有机工质。该结果与 Mago 等^[20]、Gu 等^[21]的研究结论一致。此例证明了 ORC 工质优选中多级模糊优化模型的适用性。

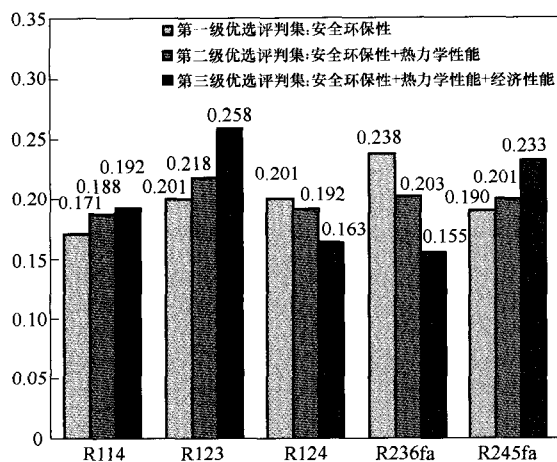


图4 三级模糊优选计算结果

Fig.4 Weight allocation diagram of available option at different level

5 结论

(1) 建立了基于多级非结构性模糊决策分析方法的 ORC 工质优选体系, 并通过某 150℃ 热源驱动的 ORC 系统的工质优选对建立的评价体系进行了验证, 得到了 3 个不同评价级对应的工质优先级排序, 对应的最优工质分别为 R236fa、R123、R123。结果表明, 工质优先级依赖所采用的评价指标, 并随 ORC 工质优选因素层的增加而变化, 基于模糊多级非结构性分析的多属性决策方法能够给出更加客观全面的优选结果。

(2) 在工质优选中采用严格流程化的多级模糊优化法, 分层逐级考虑各类因素, 降低问题的维度, 用精确的数学语言——隶属度来表示决策中的模糊性, 降低了人为主观思维对事物发展程度的认识不同而造成的决策偏差, 最终通过归一化的优先级水平值对工质进行优先级排序, 有效降低了主观因素在确定权重时的影响, 结果具有较高的可靠性。

References

[1] Hung T C. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, **42**(5): 539-553

[2] Vález F, Segovia J J, Martín M C, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical economical and market review of organic Rankine

cycles for the conversion of low-grade heat for power generation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(6): 4175-4189

[3] Sprouse III C, Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, **51**(1): 711-722

[4] Tchanche B F, Lambrinos G, Frangoudakis A, Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles — a review of various applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(8): 3963-3979

[5] Gu Wei (顾伟), Weng Yiwu (翁一武), Wang Yanjie (王艳杰), Weng Shilie (翁史烈). Thermodynamic analysis of power generation system based on closed organic Rankine cycle (ORC) [J]. *Acta Energetica Sinica (太阳能学报)*, 2008, **29**(5): 608-612

[6] Wu S Y, Yi T T, Xiao L. A review on performance indicator of organic Rankine cycle system for waste heat recovery// the 26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS) [C]. Guilin, China, 2013

[7] Liu B T, Chien K H, Wang C C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery [J]. *Energy*, 2004, **29**(8): 1207-1217

[8] Aljundi I H. Effect of dry hydrocarbons and critical point temperature on the efficiencies of organic Rankine cycle [J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**(4): 1196-1202

[9] Tian H, Shu G Q, Wei H Q, Liang X Y, Liu L N. Fluids and parameters optimization for the organic Rankine cycles (ORCs) used in exhaust heat recovery of internal combustion engine (ICE) [J]. *Energy*, 2012, **47**: 125-136

[10] Wang J F, Yan Z Q, Wang M, Li M Q, Dai Y P. Multi-objective optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, **71**: 146-158

[11] Wang Zhiqi (王志奇), Zhou Naijun (周乃君), Xia Xiaoxia (夏小霞), Wang Xiaoyuan (王晓云). Multi-objective parametric optimization of power generation system based on organic Rankine cycle [J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2013, **64**(5): 1710-1716

[12] Yang Bao'an (杨保安), Zhang Kejing (张科静). Multi-objective Decision Analysis Theory, Methods and Application Research (多目标决策分析理论、方法与应用研究)[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2008: 5

[13] Zhou G Y, Wu E, Tu S T. Optimum selection of compact heat exchangers using non-structural fuzzy decision method [J]. *Applied Energy*, 2014, **113**: 1801-1809

[14] Wu En (吴恩), Zhou Guoyan (周帼彦), Tu Shandong (涂善东), Si Haifei (司海飞). Optimum lectotype of compact heat exchangers based on multi-level fuzzy optimization [J]. *Petro-Chemical Equipment (石油化工设备)*, 2013, **42**(1): 68-72

[15] Zhai Gangjun (翟钢军), Feng Sheng (封盛), Kang Haigui (康海贵), Xu Facong (徐发淙). Optimum lectotype of offshore platform based on multi-level fuzzy optimization and non-structural fuzzy decision [J]. *Shipbuilding of China (中国造船)*, 2002, **43**(1): 23-26

[16] Chen Shouyu (陈守煜). Engineering Fuzzy Set Theory and Application (工程模糊集理论与应用) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 59-79

[17] Hallale N, Fraser D M. Capital cost targets for mass exchange

- networks A special case: Water minimization [J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, **53**(2): 293-313
- [18] Arsalis A, Calise F. Thermo-economic modeling and parametric study of hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine-steam turbine power plants ranging from 1.5 MWe to 10 MWe [J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2009, **6**(1): 11-15
- [19] Lian Z T, Chua K J, Chou S K. A thermo-economic analysis of biomass energy for trigeneration [J]. *Applied Energy*, 2010, **87**(1): 84-95
- [20] Mago P J, Chamra L M, Somayaji C. Performance analysis of different working fluids for use in organic Rankine cycles [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, **221**(3): 255-263
- [21] Gu W, Weng Y, Wang Y, Zheng B. Theoretical and experimental investigation of an organic Rankine cycle for waste heat recovery system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2009, **223**(5): 523-533